

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN

SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

FERROXPLANA MET GERICHTE KRISTALLEN

door A. L. STUIJTS en H. P. J. WIJN.

621.318.13:538.213

De magnetisch zachte materialen ferroxplana, waarover onlangs in dit tijdschrift is geschreven, bezitten een permeabiliteit die tot frequenties ver boven 100 MHz constant blijft. Het blijkt dat de kristallen van deze materialen gericht kunnen worden. Daardoor kan de permeabiliteit aanzienlijk worden verhoogd, terwijl de grensfrequentie slechts weinig afneemt. Bovendien heeft men dan een materiaal met een anisotrope permeabiliteit, waarvoor speciale toepassingsmogelijkheden bestaan.

Inleiding

Korte tijd geleden zijn in het Philipslaboratorium te Eindhoven enige nieuwe groepen ferromagnetische oxydes ontdekt, die evenals het eerder beschreven materiaal ferroxdure een hexagonale kristalstructuur bezitten. Deze materialen zijn beschreven in een artikel in dit tijdschrift ¹⁾, dat we verder als I zullen aanhalen. De samenstelling van de bedoelde verbindingen kan men aangeven in een driehoek, waarvan drie oxydes de hoekpunten vormen. Deze driehoek is in fig. 1 gereproduceerd. Hierin stelt Me een tweewaardig ion voor uit de reeks Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mg, of ook wel een mengsel van deze ionen. Op de zijden van de driehoek vinden we de verbinding B (BaFe_2O_4), de groep van verbindingen S (MeFe_2O_4 , hiertoe behoort o.a. ferroxcube) en de verbinding M ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, hoofdbestanddeel van ferroxdure). De in I besproken nieuwe groepen van verbindingen worden in de driehoek voorgesteld door de punten W ($\text{BaMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$), Y ($\text{Ba}_2\text{Me}_3\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$) en Z ($\text{Ba}_3\text{Me}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$). Later zijn nog de nieuwe groepen van verbindingen X en U ontdekt ²⁾. Indien

men b.v. in de Z-groep voor Me het Co-ion kiest, dan schrijft men deze verbinding korthedshalve als Co_2Z , daarmee aangevend dat de structuureenheid (zie I) twee Co-ionen bevat.

De bereiding van deze materialen geschiedt, evenals die van ferroxcube en ferroxdure, door sinteren op hoge temperaturen, waarbij in de vaste stof een

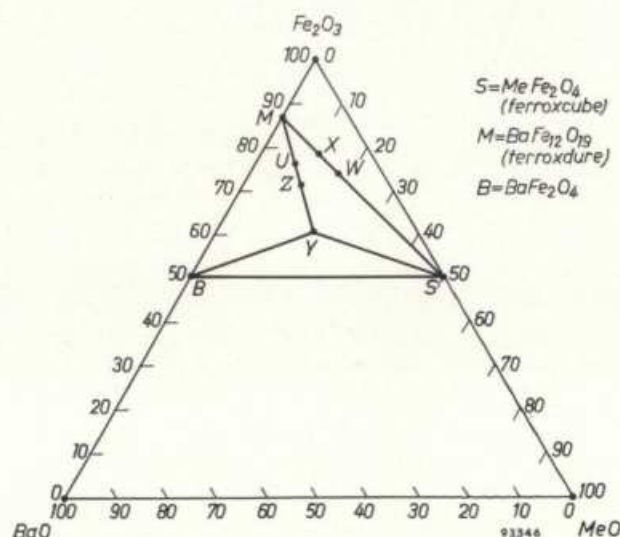


Fig. 1. De samenstelling van de materialen W, Y, Z, X en U kan worden voorgesteld door punten in de driehoek BaO-MeO- Fe_2O_3 . B, S en M stellen de bekende materialen BaFe_2O_4 , ferroxcube resp. ferroxdure voor.

¹⁾ G. H. Jonker, H. P. J. Wijn en P. B. Braun, Ferroxplana, hexagonale ferromagnetische ijzeroxydeverbindingen voor zeer hoge frequenties, Philips techn. T. 18, 253-262, 1956 (no. 9); verder aangehaald als I.

²⁾ Men zie hiervoor: P. B. Braun, diss. Amsterdam 1956, verschijnt binnenkort in Philips Res. Rep.; G. H. Jonker, Ferrimagnetic iron oxide compounds with hexagonal crystal structure, voordracht gehouden juni 1957 te Parijs op het 16e Congrès intern. chimie pure et appl.

reactie van de samenstellende oxydes optreedt. Het verkregen keramische produkt heeft een grote soortelijke weerstand (10^4 - 10^{10} ohmcm).

Het is gebleken dat alle verbindingen van de Y-groep, en verder die van de Z- en de W-groep die meer dan een zeker gehalte aan Co bevatten, in de kristallen een voorkeursvlak voor de magnetisatie vertonen; deze verbindingen worden met de naam ferroxplana aangeduid. Dit voorkeursvlak staat loodrecht op de (hexagonale) c-as (de „afkeers“-richting). De magnetische anisotropie voor draaiingen uit dit vlak is in het algemeen groot, hetgeen wil zeggen dat de magnetisatie met een grote stijfheid aan dit vlak gebonden is, zodat de permeabiliteit in de richting loodrecht op het voorkeursvlak klein is. Echter is de magnetisatie in het voorkeursvlak wel vrij gemakkelijk draaibaar (relatief kleine anisotropie voor draaiingen in het voorkeursvlak), zodat de permeabiliteit in richtingen evenwijdig aan dit vlak veel groter kan zijn ³⁾. In het polykristallijne materiaal, waar de voorkeursvlakken in allerlei richtingen liggen, heeft men dan een zekere gemiddelde, isotrope permeabiliteit. In I is aangetoond dat, als gevolg van de sterk verschillende anisotropieën, het produkt van de permeabiliteit en de frequentie waarboven de verliezen sterk toenemen (de grensfrequentie), een veel grotere waarde kan aannemen dan bij ferroxcube. Zo vindt men b.v. bij Co_2Z een permeabiliteit van omstreeks 10 bij een grensfrequentie van omstreeks 400 MHz, terwijl ferroxcube 4E met een permeabiliteit van 12 een grensfrequentie van omstreeks 90 MHz heeft.

In dit artikel zal allereerst worden besproken hoe de permeabiliteit van ferroxplana beïnvloed kan worden door een anisotrope verdeling van de oriëntaties van de kristallieten in het materiaal (textuur). Vervolgens wordt een methode van richten van de kristallen behandeld, die enigszins afwijkt van de in dit tijdschrift beschreven richtmethode voor ferroxdure ⁴⁾. Genoemd artikel zal in het vervolg worden aangehaald als II. Het zal blijken dat door het richten van ferroxplana-materialen de permeabiliteit in bepaalde richtingen veel groter kan worden; op de verklaring van dit verschijnsel wordt nader ingegaan. Door het richten wordt de grensfrequentie slechts weinig verlaagd.

³⁾ Waar hier over permeabiliteit resp. susceptibiliteit wordt gesproken, wordt steeds bedoeld de relatieve beginpermeabiliteit resp. -susceptibiliteit (in eenheden μ_0 in het Giorgi-stelsel), dus de waarde die in de gedemagnetiseerde toestand wordt gemeten bij het aanleggen van een zeer zwak magneetveld.

⁴⁾ A. L. Stuijts, G. W. Rathenau en G. H. Weber, Ferroxdure II en III, anisotrope permanent magnetische materialen, Philips techn. T. 16, 189-195, 1954; verder aangehaald als II.

Beschouwingen over anisotrope ferroxplana-materialen

Het meest anisotrope materiaal is het eenkristal. De anisotrope magnetische eigenschappen van een ferroxplana-eenkristal blijken b.v. uit fig. 2, waar de magnetisatie M is uitgezet als functie van de aangelegde inductie $\mu_0 H$ voor een eenkristal van Co_2Z . De richting van H is loodrecht op het voor-

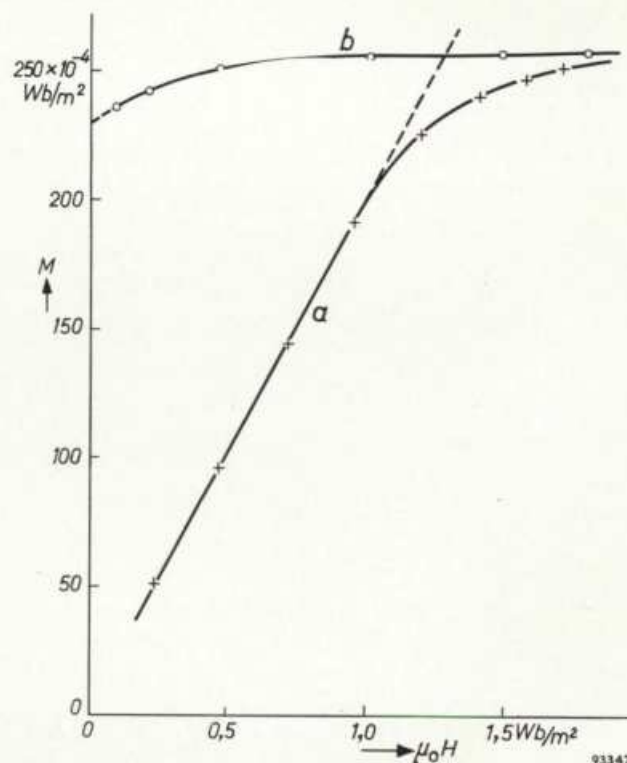


Fig. 2. De magnetisatie M van een eenkristal Co_2Z als functie van het aangelegde magneetveld H ; a voorkeursvlak loodrecht op H ; b voorkeursvlak evenwijdig aan H .

keursvlak gekozen (kromme a) dan wel parallel daaraan (kromme b). Zoals uit de figuur blijkt, is de inductie $\mu_0 H$ die men nodig heeft om het materiaal te verzadigen, in het eerste geval ca. $1,2 \text{ Wb/m}^2$ [veldsterkte 12 000 Oe], terwijl men in het tweede geval daartoe met een veel kleinere inductie kan volstaan.

In het normale polykristallijne preparaat zijn de kristallen willekeurig georiënteerd, waardoor dit preparaat isotrope magnetische eigenschappen heeft. Er zijn echter texturen mogelijk, waarbij anisotrope magnetische eigenschappen in het polykristallijne preparaat optreden. Deze texturen zijn de volgende:

1) De basisvlakken van de kristallen, die met de voorkeursvlakken samenvallen, zijn alle evenwijdig aan één lijn, zoals boven in fig. 3a is geschetst (waaierstructuur). Onder in deze figuur is de ligging van de kristallen getekend zoals ze zichtbaar worden bij doorsnijding loodrecht op de gemeen-

schappelijke lijn van de basisvlakken (de c -as van alle kristallen ligt in het vlak van deze figuur). Hierbij dient men te bedenken dat de kristallen in het algemeen plaatvormig zijn, met de kleinste afmeting in de richting van de c -as. De permeabiliteit zal nu in de richting van de gemeenschappelijke lijn groter zijn dan in het isotrope materiaal; de permeabiliteit in de andere loodrechte richtingen is hierbij kleiner.

2) Alle basisvlakken zijn onderling evenwijdig, zoals in fig. 3b is geschetst (lamellentextuur). Hierbij zal de permeabiliteit in alle richtingen evenwijdig aan de basisvlakken groter zijn.

We kunnen dit laatste als volgt inzien. Zoals bekend, wordt de permeabiliteit veroorzaakt doordat een aangelegd veld $\vec{H}$ de spontane magnetisatie $\vec{M}_s$ in ieder gebiedje van Weiss van richting doet veranderen, indien het koppel $[\vec{H}\vec{M}_s]$ van nul verschillend is. Bij ferroxplana is de magnetisatie zo sterk aan het voorkeursvlak gebonden, en de draaiing van $\vec{M}_s$ uit dit vlak daardoor zo gering, dat deze draaiing een te verwaarlozen bijdrage tot de permeabiliteit geeft. Derhalve kan alleen de component van $\vec{H}$ die in het voorkeursvlak van een bepaald kristalletje ligt, een bijdrage tot de permeabiliteit geven. Bij een ongericht preparaat, waar de kristallen isotroop georiënteerd zijn, vindt men dus een kleinere permeabiliteit dan bij een gericht preparaat waarbij men $\vec{H}$ evenwijdig aan de voorkeursvlakken aanlegt.

Voor het geval dat er geen magnetische wisselwerking tussen de kristallen bestaat, kan men

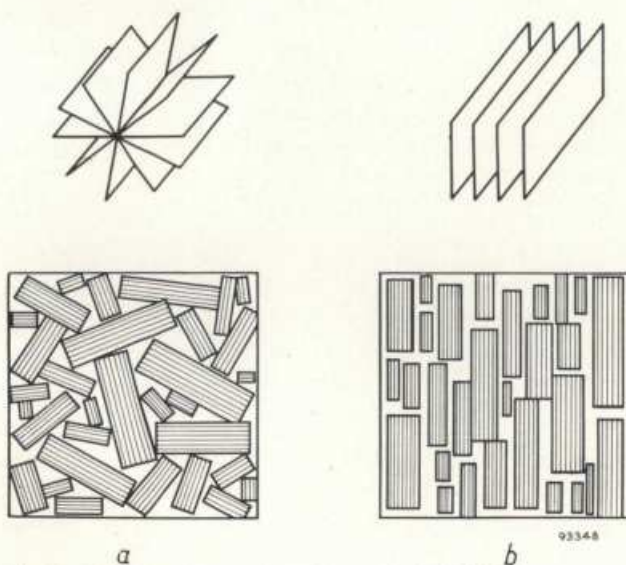


Fig. 3. Anisotroop ferroxplana. Boven: basisvlakken in perspectief; onder: ligging van kristallen bij doorsnijding loodrecht op de basisvlakken. a) Waaierstructuur, b) lamellentextuur.

berekenen dat bij het richten de susceptibiliteit $\chi_i = \mu_i - 1$ door draaiingen met een factor 1,5 zal toenemen. De wisselwerking is echter geenszins te verwaarlozen, zoals blijkt uit het geïdealiseerde geval dat in fig. 4 is afgebeeld. Hier zijn een aantal kristallen van een preparaat geschetst waarbij het voorkeursvlak van het middelste kristal evenwijdig aan de arcering en loodrecht op het vlak van tekening is aangenomen. De voorkeursvlakken van de omringende kristallen onderstellen we evenwijdig

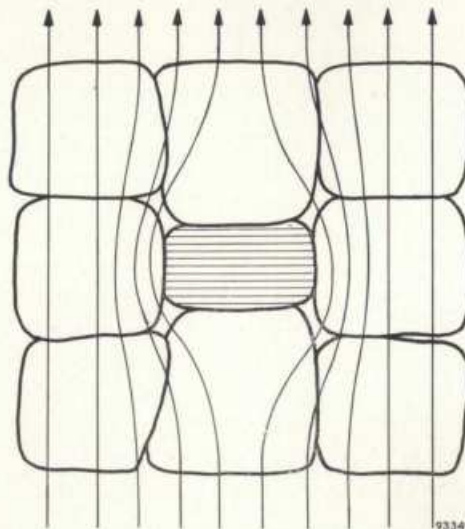


Fig. 4. Demagnetisatie door een dwarsliggend kristal in ferroxplana. De voorkeursvlakken van de omringende kristallen liggen in het vlak van tekening; dat van het dwarsliggende kristal staat loodrecht op het vlak van tekening en evenwijdig aan de arcering. De krachtlijnen moeten opzij om het dwarsliggende kristal heenbuigen.

aan het vlak van tekening. In dit geval moeten de krachtlijnen van het aangelegde veld links en rechts om het „dwarsliggende” kristal heenbuigen, zodat dit kristal een grote demagnetiserende invloed heeft. Hierdoor is de permeabiliteit kleiner dan van een preparaat waarbij de voorkeursvlakken van alle kristallen evenwijdig zijn gericht.

Uit het volgende zal blijken dat beide hier beschreven mechanismen werkzaam zijn, waardoor de permeabiliteit ten gevolge van het richten meer dan een factor 1,5 groter kan worden.

Methodes om kristallen van magnetische materialen te richten

Er zijn verschillende methodes bekend waarbij een magnetisch materiaal wordt verkregen met een textuur van de kristallen.

Bij de metallische magnetisch zachte materialen fennicube (50Ni-50Fe) en „grain-oriented” siliciumijzer (3% Si, rest Fe) wordt een kristaltextuur verkregen door walsen en vervolgens rekristalliseren. Bij fennicube komen de voorkeursrichtingen der kristal-

len loodrecht op de walsrichting te liggen, waardoor in de walsrichting het verband tussen de permeabiliteit en het aangelegde veld meer lineair wordt; bij siliciumijzer wordt de permeabiliteit in de walsrichting verhoogd, doordat de voorkeursrichtingen der kristallen parallel aan deze richting komen te liggen.

Walsen kan niet op dezelfde wijze worden toegepast bij keramische materialen, omdat ze niet plastisch vervormbaar zijn. Men zou wel gebruik kunnen maken van de reeds genoemde speciale vorm van de deeltjes (meestal plat, met in de c -richting de kleinste afmeting). Het is bij ferroxdure mogelijk gebleken een textuur te verkrijgen door een poeder in een stalen buis te persen en deze vervolgens te walsen. Het effect is echter gering en van dezelfde orde als de perstextuur die men verkrijgt door het voorgestookte poeder in een matrijs te persen.

Bij enkele magnetisch harde materialen (ferroxdure, MnBi) kan met groot succes gebruik worden gemaakt van het feit dat de magnetisatie sterk aan een voorkeursrichting is gebonden, om de kristallen te richten en daardoor een sterke toeneming van het energieprodukt $(BH)_{\max}$ te verkrijgen (voor ferroxdure, zie II). In ferroxplana is de magnetisatie niet sterk aan een voorkeursrichting doch sterk aan een voorkeursvlak gebonden, hetgeen tot gevolg heeft dat het magnetisch zacht is. Het is hier eveneens mogelijk gebleken de kristallen te richten door gebruik te maken van een magneetveld. We gaan daarbij uit van een homogeen magneetveld $\vec{H}$,

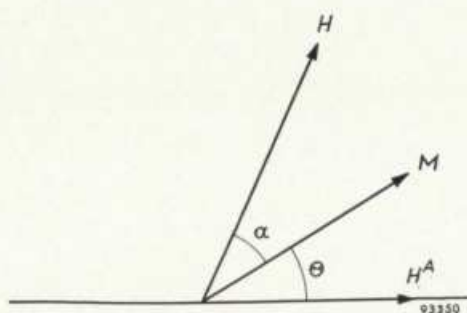


Fig. 5. Draaiing van een ferroxplanakristal in een uitwendig veld H . Ten gevolge van de op M_s werkende koppels $\mu_0 H M_s \sin \alpha$ en $\mu_0 H^A M_s \sin \theta$ wordt het voorkeursvlak naar een stand evenwijdig aan H getrokken.

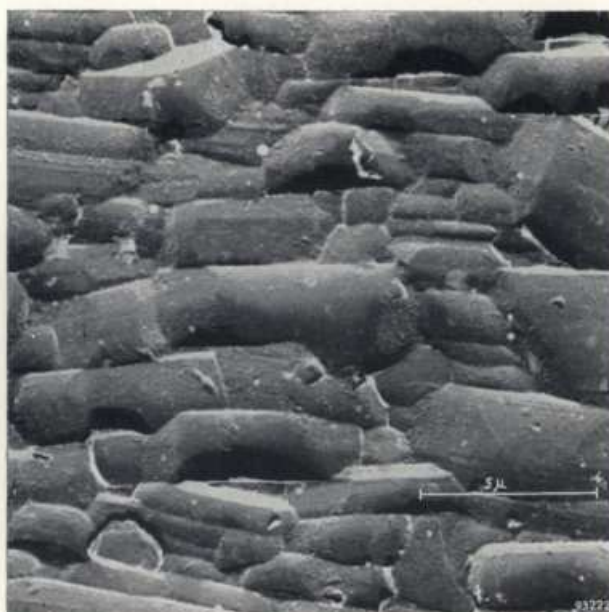
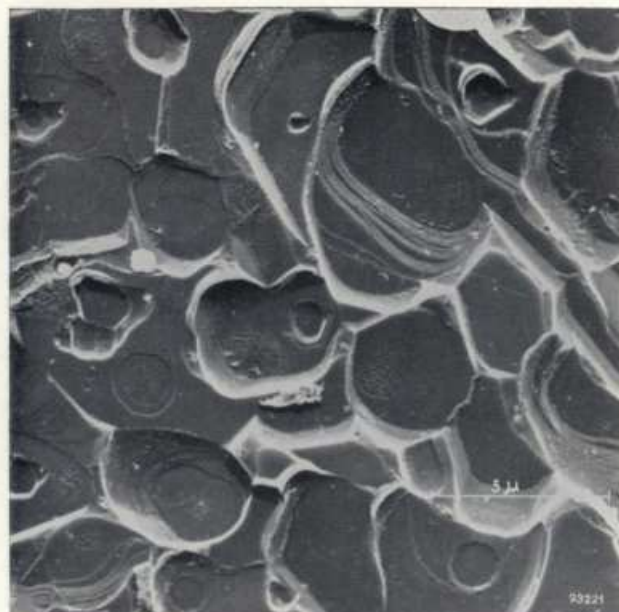
waarin een verzameling ferroxplanakristallen wordt gebracht, die we stuk voor stuk vrij draaibaar veronderstellen. De spontane magnetisatie $\vec{M}_s$ van elk deeltje wordt nu in de richting van $\vec{H}$ getrokken met een koppel $\mu_0 [\vec{H} \vec{M}_s] = \mu_0 H M_s \sin \alpha$, zie fig. 5, waar-

bij α de hoek is tussen de magnetisatie $\vec{M}_s$ en de veldrichting. Door het veld H^A dat samenhangt met de kristalanisotropie voor draaiingen uit het voorkeursvlak, wordt $\vec{M}_s$ gebonden aan het voorkeursvlak met een koppel $\mu_0 [\vec{H}^A \vec{M}_s] = \mu_0 H^A M_s \sin \theta$, waarbij θ de hoek is tussen de magnetisatie en het voorkeursvlak. Het deeltje zal dan gaan draaien totdat in evenwicht $\alpha = \theta = 0$, zodat het voorkeursvlak dan evenwijdig is met H . Het kan verder nog willekeurig staan, zodat we hier een waaiertextuur hebben verkregen.

Om de lamellentextuur te verkrijgen, onderwerpen we het poeder afwisselend aan twee magneetvelden, waarvan de krachtlijnen loodrecht op elkaar staan, b.v. door twee gekruiste elektromagneten afwisselend te bekrachtigen. De enige stabiele toestand voor de oriëntatie van de deeltjes is nu deze waarbij het voorkeursvlak evenwijdig staat aan beide veldrichtingen, dus de lamellentextuur. Deze evenwichtstoestand ontstaat natuurlijk alleen indien de beweging van de deeltjes gedempt is, maar hier is in de praktijk altijd aan voldaan. In plaats van de beide afwisselende, onderling loodrechte velden kan men gebruik maken van een magnetisch veld waarvan de richting continu verandert, maar in één vlak gelegen is, dus een draaiend magnetisch veld, dat b.v. verkregen kan worden door een magneetjuk mechanisch te draaien. Ook bij een stilstaande magneet kan met behulp van de drie fazen van het net een magnetisch draaiveld worden verkregen. Door U. Enz is volgens dit principe in het Philipslaboratorium te Eindhoven een elektromagneet ontwikkeld die voor het richten zeer geschikt is gebleken.

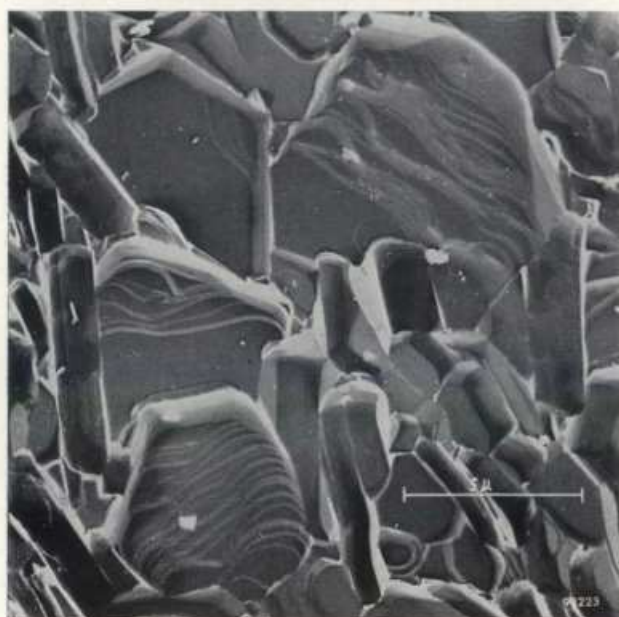
Om tot een goed resultaat te komen, moet men aan een aantal voorwaarden voldoen. Uitgegaan wordt van een magnetisch poeder, dat door voorsinteren en vervolgens malen wordt verkregen. In de eerste plaats moeten de voorkeursvlakken van de kristallen in één deeltje onderling evenwijdig zijn (zie II). Verder gebruikt men bij voorkeur een suspensie van het poeder in een vloeistof, om een toestand te verkrijgen waarin de deeltjes zo goed mogelijk draaibaar zijn. Ten einde een goed keramisch eindprodukt te kunnen maken, moeten de deeltjes na de ordening zo compact mogelijk op elkaar gestapeld zijn. Daarom wordt het proces van het richten der deeltjes met de persbehandeling gecombineerd. Dit betekent echter dat de deeltjes elkaar hinderen, zodat nooit een ideaal gerichte toestand wordt bereikt.

De methode kan verder alleen worden toegepast indien het hoofdanisotropieveld H^A niet te zwak is.



a Fig. 6. Elektronenmicroscopische opnamen van gericht ferroplana met lamellentextuur. In (a) liggen de voorkeursvlakken evenwijdig aan het vlak van het papier, in (b) staan zij loodrecht daarop.

b



a Fig. 7. Opnamen van een preparaat met waaierstructuur; de richting waaraan de voorkeursvlakken evenwijdig zijn, ligt bij (a) in het vlak van het papier (ongeveer van onder naar boven) en bij (b) loodrecht op dat vlak.

b

Voor materialen met een samenstelling waarbij dit wel het geval is, zoals bepaalde mengkristallen van Co_2Z met andere Me_2Z -verbindingen, is het resultaat dus gering. Van deze materialen kan men echter zeggen dat zij het voor ferroplana typische effect in veel mindere mate vertonen.

Fig. 6 laat een tweetal met de elektronenmicroscopie gemaakte foto's zien, waarop de lamellentextuur van de kristallen duidelijk te zien is. In fig. 6a liggen de voorkeursvlakken, tevens basis-

vlakken van de kristallen, evenwijdig aan het vlak van het papier, in fig. 6b liggen zij loodrecht daarop. Hier ziet men ook de vrij duidelijke plaatjesvorm van de kristallen. Fig. 7 geeft twee opnamen van een waaierstructuur. In fig. 7a ligt de richting waaraan alle voorkeursvlakken evenwijdig zijn, in het vlak van het papier, in fig. 7b staat zij loodrecht daarop.

Bij het sinteren treedt bij gericht ferroplana, evenals bij gericht ferroxdure, een anisotrope krimp op. In de richting van de hexagonale assen van de

kristallen is de krimp veel groter dan in een richting loodrecht daarop, zoals duidelijk blijkt uit fig. 8.

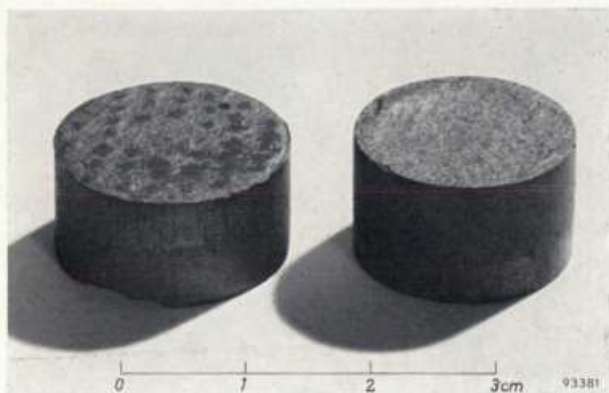


Fig. 8. Bij het sinteren van een gericht geperst materiaal treedt een anisotrope krimp op. Rechts een ongericht preparaat, links een gericht met lamellentextuur. In dit laatste geval is de krimp in de richting van de c -assen der kristallen groot, terwijl loodrecht daarop een kleinere krimp optreedt. Vóór het sinteren waren de afmetingen van beide preparaten gelijk.

Eigenschappen van gericht ferroxplana

De richtgraad

De kristalanisotropie-energie kan men bij een eenkristal vinden door de magnetisatiekromme zowel in de voorkeursrichting als in de „afkeers”-richting te bepalen, zoals in fig. 2. De genoemde energie is gelijk aan de oppervlakte tussen de beide krommen.

Voor een materiaal met de lamellentextuur kunnen we, omdat we de stand van het voorkeursvlak kennen, eveneens zowel in de „afkeers”-richting als evenwijdig aan het voorkeursvlak de magnetisatiekromme opnemen. Indien we de anisotropie in het vlak verwaarlozen, kunnen we op deze wijze ook bij een ideaal gericht materiaal de kristalanisotropie-energie bepalen. Wanneer het materiaal niet ideaal gericht is, zullen de beide krommen dicht bij elkaar gelegen zijn en een oppervlakte insluiten die een fractie f is van de oppervlakte tussen de krommen voor het eenkristal. Wij zullen deze fractie f de richtgraad van het anisotrope materiaal noemen. Voor de materialen met waaierstructuur is deze bepaling niet mogelijk, omdat de voorkeursvlakken niet evenwijdig liggen.

De richtgraad van gerichte preparaten blijkt tot meer dan 90% te kunnen oplopen.

De permeabiliteit

Om te kunnen beoordelen hoe de permeabiliteit afhangt van de richtgraad, hebben we een aantal Co_2Z -preparaten met lamellentextuur gemaakt. De richtgraad kon van preparaat tot preparaat worden gevarieerd door regeling van de stroom die het draaiveld veroorzaakt. De dichtheid is bij alle

preparaten ongeveer dezelfde. In fig. 9 is de permeabiliteit van deze preparaten tegen de bijbehorende richtgraad uitgezet. Uit deze figuur blijkt duidelijk de grote winst in permeabiliteit die vooral bij een hoge richtgraad wordt verkregen. Bij de verbinding $\text{Co}_{0,8}\text{Zn}_{1,2}\text{Z}$, waarvan het ongericht materiaal de permeabiliteit 22 heeft, werd door het richten een permeabiliteit van 55 bereikt. Het ziet er naar uit dat, bij een nog vollediger richten dan tot nu toe mogelijk is gebleken, de permeabiliteit nog zal toenemen.

Bij het meten van de permeabiliteit is het aangelegde veld uiteraard evenwijdig aan de voorkeursvlakken genomen. Wanneer we loodrecht hierop meten, verwachten we een geringere permeabiliteit dan in het isotrope materiaal. Inderdaad werd op deze manier bij het Co_2Z -preparaat met $f = 0,91$ een permeabiliteit van slechts 2,5 gemeten. Voor een ideaal gericht preparaat berekent men de waarde 1,3.

Behalve door de grotere permeabiliteit zal het nieuwe materiaal ook door het anisotrope karakter van de permeabiliteit voordelen kunnen hebben, bij gebruik in een magnetisch circuit met een luchtspleet. De spreiding zal dan loodrecht op de richting van de flux gering zijn dank zij de geringe permeabiliteit in deze richting. Men kan hier b.v. denken aan toepassing bij de omgeving van de luchtspleet van een schrijfkop voor magnetische registratie,

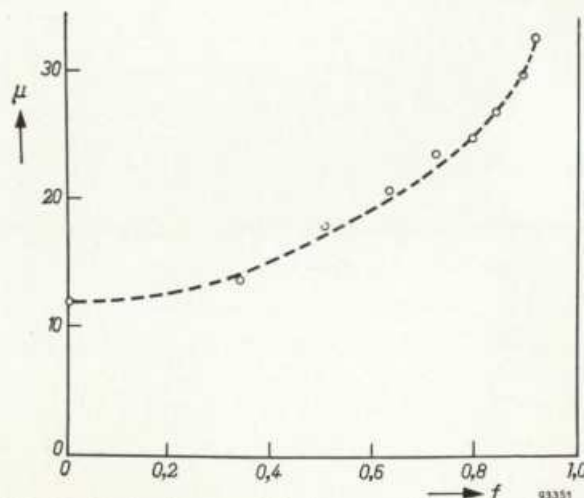


Fig. 9. De beginpermeabiliteit μ van Co_2Z -materialen met verschillende richtgraad f .

waar het spreidingsveld bij voorkeur in een zo klein mogelijke ruimte moet worden geconcentreerd, of aan het verkrijgen van een meer homogeen veld in een luchtspleet.

Wanneer men gerichte preparaten maakt met een waaierstructuur, vindt men in de gunstigste richting eveneens een grotere permeabiliteit dan in het over-

Tabel I. De invloed van de sintertemperatuur op de richtgraad f en permeabiliteit μ van Co_2Z -preparaten.

Sintertemperatuur	f	μ
1180 °C	0,65	10,5
1200 °C	0,65	11,3
1220 °C	0,72	12,4
1240 °C	0,77	18,5
1260 °C	0,89	32,0

eenkomstige ongerichte preparaat. De toeneming is echter altijd kleiner dan bij het aanbrengen van de lamellentextuur. We veronderstellen dat dit veroorzaakt wordt doordat de richtgraad van een waaiertextuur altijd kleiner zal zijn dan die van een lamellentextuur. Bij deze laatste vinden we nl. evenals bij ferroxdure (zie II) een sterke vergroting van het richtpercentage tijdens het sinteren op hoge temperatuur. Dit blijkt duidelijk uit tabel I; de mate van sinteren is hier van preparaat tot preparaat gevarieerd door de sintertemperatuur verschillend te kiezen. Het is waarschijnlijk zo dat de goed georiënteerde kristallen uitgroeien ten koste van de verkeerd georiënteerde, zoals in II is beschreven. Het is niet waarschijnlijk dat een dergelijke textuurverbetering, die nodig is om een hoge richtgraad te verkrijgen, zal optreden bij een materiaal waarin de basisvlakken nog waaivormig zijn verdeeld. Zoals boven is beschreven, kunnen we dit niet op directe wijze controleren, omdat f bij een materiaal met waaiertextuur niet te meten is.

Ook de spanningsanisotropie kan een permeabiliteitsverschil tussen de materialen met de beide texturen veroorzaken. Door de anisotrope uitzettingscoëfficiënt van de kristallen zullen in een materiaal met waaiertextuur bij het afkoelen meer spanningen optreden dan in een materiaal met lamellentextuur. Indien de magnetostrictie groot is, zal hierdoor een kleinere permeabiliteit worden gevonden.

We hebben gezien dat de permeabiliteit door het richten veel meer is toegenomen dan de factor 1,5 die men bij ideaal richten kan winnen doordat men het uitwendige veld evenwijdig aan de voorkeursvlakken kan aanbrengen. Zoals we reeds aangestipt hebben, is de verdere winst zeer waarschijnlijk hieraan te danken dat in gerichte preparaten de inwendige demagnetisatie gemiddeld veel kleiner zal zijn dan in ongerichte, zie fig. 4. We zullen dit nu nader gaan onderzoeken.

De inwendige demagnetisatiefactor

Ferroxplana is evenals ferroxcube een gesinterd produkt, dat poriën bevat. Hierdoor treden inwendige demagnetiserende velden op, die een verklei-

ning van de permeabiliteit geven. Een goede indruk van de demagnetisatie door poriën krijgt men door het meten van de zg. ideale kromme. Daartoe wordt op een constant uitwendig magneetveld H een wisselend magneetveld gesuperponeerd, waarvan de amplitude geleidelijk van een grote waarde tot nul afneemt. De kromme welke het verband geeft tussen de op deze wijze verkregen magnetisatie en de intensiteit van het constante magneetveld, wordt de ideale magnetiseringskromme genoemd. Als geen demagnetisatie aanwezig is, raakt de kromme in de oorsprong aan de magnetisatie-as, $(dH/dM)_{H=0} = 0$. Door de demagnetisatie is het inwendige magneetveld H_i niet gelijk aan het uitwendig aangelegde magneetveld H en zal de ideale kromme een hoek α met de magnetisatie-as maken, bepaald door $\text{tg } \alpha = dH/dM = N_i$, waarbij N_i de inwendige demagnetisatiefactor is; zie fig. 10. Het blijkt dat tussen N_i en de porositeit p voor een aantal

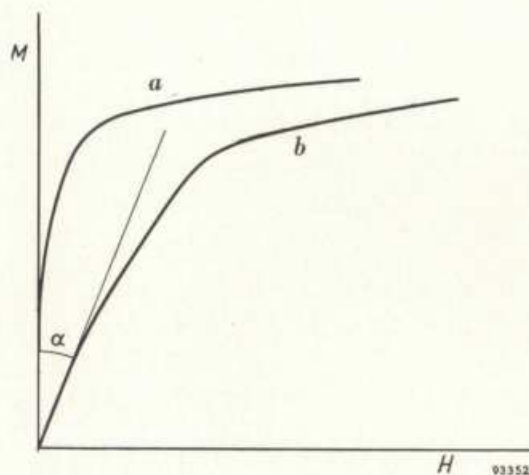


Fig. 10. De zg. ideale magnetisatiekromme; a) geen inwendige demagnetisatie, b) inwendige demagnetisatie $N_i = \text{tg } \alpha$.

ferroxcubesoorten een verband bestaat, hetwelk door de kromme a in fig. 11 wordt weergegeven. Zolang N_i klein is, zal μ niet door inwendige demagnetisatie worden begrensd, maar door andere anisotropieën; men vindt in dit gebied dan ook kleine en grote permeabiliteiten naast elkaar. Wanneer N_i echter groot wordt, zal de permeabiliteit door inwendige demagnetisatie niet meer zeer groot kunnen worden; de gevonden waarden van μ nemen inderdaad met toenemende N_i monotoon af.

Wanneer we op dezelfde manier het verband bepalen tussen N_i en p voor diverse ongerichte ferroxplanamaterialen, krijgen we een geheel ander beeld, zoals blijkt uit kromme b in fig. 11. Zelfs bij zeer dichte materialen krijgen we een vrij grote factor N_i , die bovendien snel met de porositeit toeneemt; deze kromme is blijkbaar ten opzichte van die van

ferroxcube een eind naar links verschoven. De bijbehorende permeabiliteiten zijn klein. We kunnen dit afwijkende gedrag begrijpen met behulp van fig. 4; de dwarsliggende kristallen beïnvloeden de krachtlijnen op dezelfde wijze als een luchtholte.

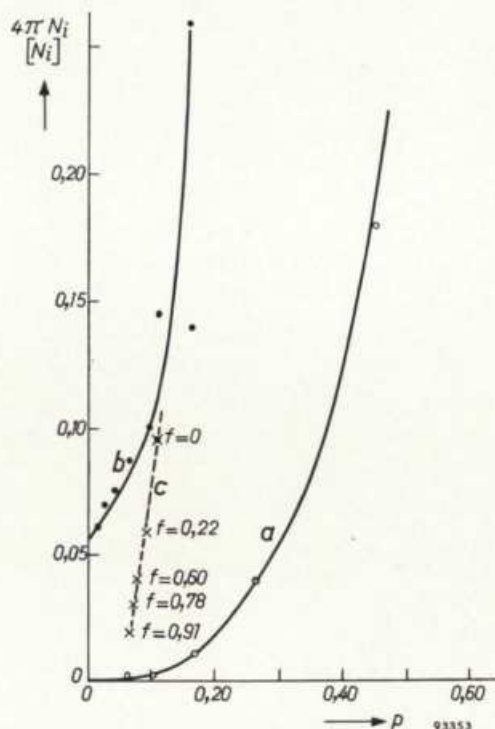


Fig. 11. De inwendige demagnetisatiecoëfficiënt N_i als functie van de porositeit p : a) voor ferroxcube; b) voor ongericht ferroplana; c) voor gericht Co_2Z met verschillende richtgraad f .

De demagnetiserende invloed is nog groter: in de omringende kristallen moeten de krachtlijnen evenwijdig aan het voorkeursvlak blijven lopen, dus in het vlak van tekening. Zij kunnen er dus slechts links en rechts omheenbuigen en niet ook naar voren en naar achteren. Het is derhalve begrijpelijk dat van een vrijwel dicht ongericht ferroxplanamateriaal de inwendige demagnetisatie even groot is als van een ferroxcubemateriaal met een porositeit van omstreeks 30%.

Vervolgens meten we N_i en p voor de gerichte ferroxplanapreparaten, waarvan we in fig. 9 het verband tussen μ en f hebben gegeven. Deze meetresultaten zijn in fig. 11 met bijgeschreven richtgraad uitgezet. We zien dat N_i sterk afneemt met toenemende richtgraad f , geheel in overeenstemming met de verwachting: we naderen tot de ideaal gerichte toestand, waarbij evenals bij ferroxcubematerialen N_i uitsluitend door de porositeit wordt bepaald. Bij goed gerichte materialen wordt de grootste permeabiliteitswinst verkregen, doordat de demagnetiserende invloed van verkeerd georiënteerde kristallen wordt vermeden.

De frequentieafhankelijkheid van de permeabiliteit

Voor toepassing bij hoge frequenties is het verkrijgen van een grotere permeabiliteit alleen dan van waarde als de grensfrequentie daarbij niet in sterke mate wordt verlaagd. Daarom is de complexe permeabiliteit $\mu = \mu' - j\mu''$ (μ'' is een maat voor de verliezen: $\tan \delta = \mu''/\mu'$) als functie van de frequentie gemeten bij gerichte preparaten met de samenstelling Co_2Z resp. $\text{Co}_{0.8}\text{Zn}_{1.2}\text{Z}$. De resultaten zijn in fig. 12 resp. 13 uitgezet; ter vergelijking zijn hierbij de krommen getekend voor de ongericht materialen. In beide figuren valt het op dat de frequentie van de top van de μ'' -kromme door het richten slechts weinig is verminderd, in ieder geval met een kleinere factor dan die waarmee de permeabiliteit is vergroot. Hetzelfde geldt voor de grensfrequentie f_r , als men die b.v. definieert als die frequentie waarvoor $\tan \delta = 0.1$, dus de frequentie van het snijpunt van de bijbehorende μ' - en μ'' -krommen op de getekende schaal.

We kunnen dit op de volgende wijze verklaren. Vergeleken met een ongericht preparaat, zal een ideaal gericht preparaat, als het anisotropieveld H_{φ}^A voor draaiingen in het voorkeursvlak niet verandert, een 1,5 maal zo grote susceptibiliteit vertonen voor een veld dat evenwijdig aan het voorkeursvlak wordt aangelegd. Zoals we hierboven hebben beschreven, wordt door vermindering van de inwendige demagnetisatie het anisotropieveld H_{φ}^A kleiner; dit geeft een extra vergroting van de susceptibiliteit. Het grote anisotropieveld H_{φ}^A voor draaiingen uit het vlak verandert door het richten niet, afgezien van eventuele, relatief kleine, effecten door verandering van de vormanisotropie. Wanneer we alle grootheden

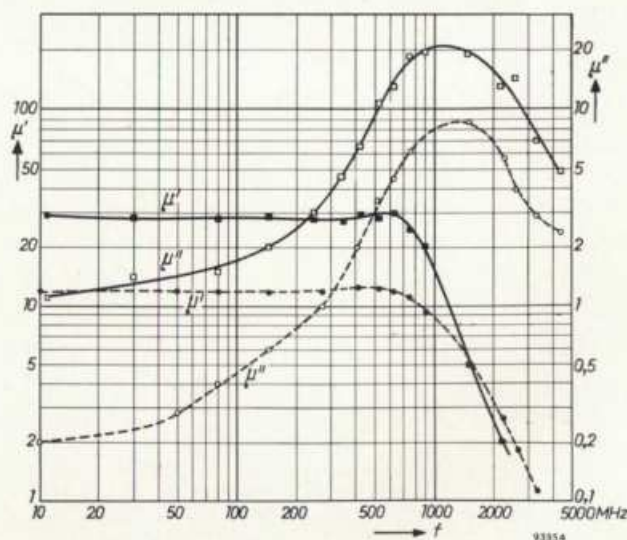


Fig. 12. μ' en μ'' als functie van de frequentie f ; getrokken voor gericht Co_2Z ; gestippeld voor ongericht Co_2Z .

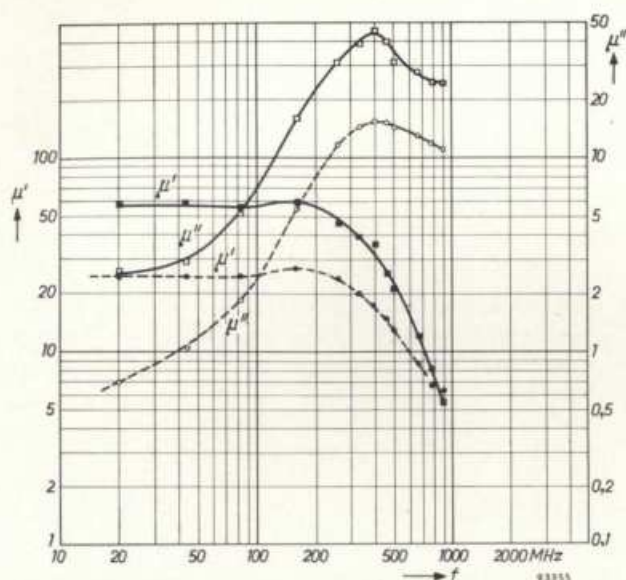


Fig. 13. μ' en μ'' als functie van de frequentie voor $\text{Co}_{0.8}\text{Zn}_{1.2}\text{Z}$; getrokken voor gericht, gestippeld voor ongericht materiaal.

van het ongerichte materiaal de index 1 geven en die van het gerichte materiaal de index 2, dan geldt dus:

$$\frac{\chi_2}{1,5\chi_1} = \frac{(H_\varphi^A)_1}{(H_\varphi^A)_2}.$$

Uit I weten we dat de grensfrequentie f_r even-

redig is met $\sqrt{H_\varphi^A H_\varphi^A}$. Aangezien $(H_\varphi^A)_1 = (H_\varphi^A)_2$, volgt hieruit:

$$\frac{f_{r2}}{f_{r1}} = \sqrt{\frac{(H_\varphi^A)_2}{(H_\varphi^A)_1}} = \sqrt{\frac{1,5\chi_1}{\chi_2}} = \sqrt{\frac{1,5(\mu_1 - 1)}{\mu_2 - 1}}.$$

Uit de permeabiliteiten μ_1 en μ_2 berekenen we voor Co_2Z de verhouding $f_{r2}/f_{r1} = 0,77$; voor $\text{Co}_{0.8}\text{Zn}_{1.2}\text{Z}$ wordt gevonden $f_{r2}/f_{r1} = 0,80$. We zien uit de fig. 12 en 13 dat dit in goede overeenstemming is met de experimentele gegevens.

Door het richten van ferroxplana beschikken we dus nu over materialen met een permeabiliteit van 30 tot 50 die geringe verliezen vertonen tot frequenties van 200 resp. 100 MHz.

Samenvatting. Doordat de magnetisatie van ferroxplana-materialen sterk aan het voorkeursvlak is gebonden, kunnen de deeltjes van een poedervormig preparaat in een uitwendig magnetisch veld worden gericht. In een homogeen veld staan alle voorkeursvlakken evenwijdig aan de veldrichting (waaierstructuur); in een draaiveld komen alle voorkeursvlakken min of meer evenwijdig te staan (lamellentextuur). De permeabiliteit wordt hierdoor anisotroop en neemt in bepaalde richtingen toe; een belangrijk deel van deze permeabiliteitswinst wordt verkregen doordat het grote ontmagnetiserende effect van dwarsliggende kristallen door het richten wordt vermeden. In een aantal gerichte preparaten wordt de permeabiliteit zo met een factor 2,5 à 3 verhoogd. Voor het gebruik bij hoge frequenties is het belangrijk dat de grensfrequentie slechts weinig afneemt; deze is bij de gerichte preparaten ongeveer 0,8 maal zo groot als bij de ongerichte. Dit effect kan kwantitatief worden verklaard. Ook het anisotroop zijn op zichzelf van de permeabiliteit kan in bepaalde gevallen nuttig worden toegepast.

NALEVERINGSKATODES

I. INLEIDING EN OVERZICHT

II. DE GEPERSTE KATODE

III. DE GEÏMPREGNEERDE KATODE

De L-katode heeft sinds zijn introductie in 1949 reeds in vele soorten elektronenbuizen toepassing gevonden, o.a. in televisie-opneembuizen, schijftriodes, klystrons en magnetrons. Bij de verdere ontwikkeling zijn twee nieuwe varianten van de L-katode geschapen, die er constructief sterk van verschillen en die er wellicht toe zullen bijdragen het toepassingsgebied voor dit soort katodes nog aanzienlijk te verruimen.

I. INLEIDING EN OVERZICHT

door A. VENEMA.

621.385.032.213.13

De L-katode, die in het Philipslaboratorium te Eindhoven is ontwikkeld en die enige jaren geleden in dit tijdschrift werd beschreven ¹⁾, bezit een aantal zeer aantrekkelijke eigenschappen. Hoewel voor vele bijzonderheden naar het genoemde artikel kan worden verwezen, zullen hier toch enkele eigenschappen worden besproken die in het bijzonder verband houden met de ontwikkeling van twee nieuwe katodetypes, welke vervolgens door Hughes en Coppola en door Levi behandeld zullen worden.

Onderzoekingen welke in het Philipslaboratorium in Irvington (U.S.A.) door Rittner, Rutledge en Ahlert zijn uitgevoerd ²⁾, hebben geleid tot een helder inzicht in het mechanisme van de L-katode. Aan dit onderzoek zal te zijner tijd in dit tijdschrift aandacht worden geschonken.

Bij de L-katode, die een thermische elektronen-emissor is, bestaat het elektronenemitterende vlak uit poreus wolfram. Het poreuze wolframlichaam vormt een wand van een kamertje, waarvan de andere wanden uit dicht gesinterd molybdeen bestaan. In het kamertje wordt bij de fabricage van de katode een tabletje gebracht dat bestaat uit mengkristallen van bariumcarbonaat en strontiumcarbonaat. Na de montage in de buis wordt bij het pompproces de katode verhit, waarbij de carbonaten ontleden en de oxydes worden gevormd. Het kooldioxyde dat bij de ontleding vrijkomt, kan door het poreuze wolframlichaam de katode verlaten en wordt weggepompt. Bij deze ontleding bevindt het

wolfram zich op een temperatuur van ongeveer 1100 °C. Het is gebleken dat de oxydatie welke het wolfram hierbij ondergaat, een ongunstige invloed heeft op de tijdsduur van het later volgende activeringsproces. Dit activeringsproces, dat begint zodra de produktie van kooldioxyde is geëindigd, wordt uitgevoerd bij een temperatuur van ongeveer 1250 °C. Het blijkt dat daarbij de elektronenemissie van het poreuze wolframvlak, welke aanvankelijk gering is, min of meer regelmatig aangroeit. Meestal wordt het proces op een bepaald ogenblik onderbroken om de buis van de pomp te verwijderen. De emissie heeft dan nog niet zijn eindwaarde bereikt, maar de stijging is betrekkelijk langzaam geworden. De activering wordt op een brandraam voortgezet tot de emissie niet verder aangroeit. De katode is dan voor het gebruik gereed. De toestand waarin de andere onderdelen en de wand van de buis zich bevinden, is van grote invloed op de tijdsduur van het activeringsproces.

De emissie-eigenschappen van een katode kunnen worden gekarakteriseerd door de twee constanten A en φ_0 in de formule van Richardson, zoals deze door Schottky werd aangevuld ³⁾. Deze formule luidt:

$$j_s = AT^2 e^{-\frac{e\varphi_0}{kT}}; \quad A = A_0 e^{-\frac{\varepsilon}{k} \frac{\Delta T}{T}},$$

waarin

j_s = verzadigingsstroomdichtheid in A/cm²,

A_0 = emissieconstante in A/cm²graad²,

T = absolute temperatuur in °K,

ε = lading van het elektron in C,

¹⁾ H. J. Lemmens, M. J. Jansen en R. Loosjes, Philips techn. T. II, 349, 1949.

²⁾ E. S. Rittner, R. H. Ahlert en W. C. Rutledge, J. appl. Phys. 28, 156, 1957 (no. 2).
W. C. Rutledge en E. S. Rittner, J. appl. Phys. 28, 167, 1957 (no. 2).

³⁾ W. Schottky en H. Rothe, Handb. Experimentalphysik, Akad. Verlagsges., Leipzig 1928, deel XIII-2, blz. 45.

φ_0 = naar 0 °K geëxtrapoleerde uittreepotentiaal φ in V,

k = constante van Boltzmann in Wsec/graad,

$\frac{\Delta \varphi}{\Delta T}$ = temperatuurcoëfficiënt van φ .

De emissieconstante A_0 wordt gegeven door de uitdrukking

$$A_0 = G \bar{D} \frac{2\pi m \varepsilon k^2}{h^3},$$

waarin

G = bezettingsgetal (meestal 2),

$\bar{D}$ = gemiddelde elektronendoorlating van de potentiaalbarrière aan het emitterende oppervlak,

m = massa van het elektron (in gram),

h = constante van Planck (in watt $\times$ sec²).

Voor de L-katode is de waarde van A ongeveer 2,5 A/cm²graad² en die van φ_0 1,67 V (zie ²⁾). (Dit betekent dat bij een temperatuur van 1400 °K deze katode een verzadigingsemissie zou hebben van 4,7 A/cm² als geen uitwendig elektrisch veld aan de katode zou heersen.) Voor wolfram bedraagt de waarde van φ_0 4,54 V.

De vermindering van de uittreepotentiaal wordt verklaard door de adsorptie van barium- en zuurstofatomen aan het wolframoppervlak. De bariumatomen zijn ontstaan door reductie van het in het kamertje verdampte bariumoxyde door het wolfram en zijn door het poreuze wolframlichaam heen naar het katodeoppervlak gekomen. De bijzondere eigenschappen van de L-katode hangen samen met het metallieke karakter van het emitterende oppervlak en met de nalevering van barium uit de kamer, welke voortduurt tot het ogenblik waarop het bariumoxyde geheel is gereduceerd (vandaar de benaming „naleveringskatode” voor dit type katode; Engels: „dispenser cathode”).

Als bijzondere voordelen van de L-katode moeten worden genoemd:

- 1) Een grote emissie, welke zelfs bij continue belasting door de katode kan worden geleverd.
- 2) Goede mechanische eigenschappen, daar het wolframoppervlak bijzonder sterk is.
- 3) Een emitterend oppervlak dat zeer goed vlak en glad kan worden gemaakt.
- 4) Een verwaarloosbaar klein potentiaalverval over de katode.
- 5) Een levensduur van enkele duizenden uren, ook bij relatief hoge druk van restgassen in de buis.
- 6) Vermogen om zich te herstellen van vergiftiging.
- 7) Een goede bestandheid tegen ionenbombardement.

De eerste vier voordelen zijn het gevolg van de metallieke aard van de katode. De stroom welke

deze katode levert, produceert slechts een kleine hoeveelheid warmte in het wolframlichaam zelf, doordat de elektrische weerstand van dat lichaam gering is. In dit opzicht is er een groot verschil met een katode waarbij een halfgeleider voor de elektronenemissie zorgt, zoals bij een oxydekathode. Hierbij wordt, bij grote stroomdichtheid, de warmteontwikkeling in de katode zelf zo aanzienlijk dat verwoesting optreedt.

De onder 5) en 6) genoemde voordelen zijn het gevolg van de voortdurende nalevering van barium. Nadat vergiftiging van de katode is opgetreden, blijkt de emissie zich te herstellen, in een tijdsduur die, afhankelijk van de temperatuur, varieert van enige seconden tot een paar minuten.

Het zevende voordeel — bestandheid tegen ionenbombardement — hangt samen zowel met het metaalkarakter als met de bariumnalevering.

Naast de genoemde voordelen mogen enige beperkingen niet onvermeld blijven:

- 1) Een niet zeer korte pomp- en activeringstijd. Gewezen is reeds op de oxydatie van het poreuze wolfram en de invloed hiervan op de tijd van activering. Daarnaast speelt ook de tijd welke nodig is om de carbonaten te ontleden, een niet te verwaarlozen rol in de gehele pomptijd. Deze ontleding mag namelijk niet te snel (dus niet bij te hoge temperatuur) gebeuren, om de oxydatie niet te sterk te doen zijn. Een te langzame ontleding daarentegen vraagt weer te veel tijd. Hier moet dus een compromis worden gevonden.
- 2) De noodzakelijkheid van een goed sluitende verbinding tussen het poreuze wolframlichaam en het molybdeen. Is deze verbinding niet dicht, dan ontsnapt het barium via het lek en gaat niet door de poriën van het wolfram. Het gevolg is een overmatige verdamping en een kortere levensduur. Ook de emissie kan ongunstig beïnvloed worden. Het is gebleken dat een las, hetzij een weerstandslas, hetzij een booglas, de mogelijkheid biedt de verbinding geheel dicht te maken. Dit lasproces, dat onder sterk verminderde druk of in een schutgas wordt uitgevoerd, is voor massafabricage echter niet zeer aantrekkelijk.
- 3) Er is een zekere beperktheid in de afmetingen waarin de L-katode kan worden gemaakt. Het is direct duidelijk dat bij zeer kleine katodes de constructie met het kamertje moeilijk kan worden. Aan de andere kant kunnen bij zeer grote katodes moeilijkheden optreden met de temperatuurverdeling over het oppervlak, doordat de warmte voor een belangrijk deel via de las met het molybdeen wordt toegevoerd. Op een wat

grotere afstand van de las is de temperatuur lager dan in de onmiddellijke omgeving daarvan.

De hier genoemde beperkingen waren aanleiding tot een onderzoek, dat in het Philipslaboratorium in Irvington is uitgevoerd. Met behoud van de voordelen heeft men getracht de beperkingen te overwinnen, met het resultaat dat twee nieuwe types katodes ontstonden. Deze katodes, de geperste katode⁴⁾ en de geïmpregneerde katode⁵⁾⁶⁾⁷⁾, werken volgens hetzelfde principe als de L-katode. Het emitterende vlak is wolfram of een wolfram-molybdeenlegering, waarvan de uittreepotentiaal weer is verlaagd door de adsorptie van barium- en zuurstofatomen. In tegenstelling met de L-katode, bevindt de bariumleverende verbinding zich hier niet in een afzonderlijk kamertje, maar deze is bij beide nieuwe types opgenomen in de holten van het poreuze metalen lichaam.

Vooruitlopend op de hieronder volgende besprekingen van de geperste en de geïmpregneerde katode, kan reeds worden opgemerkt dat de emissie-eigenschappen van de drie types in grote trekken dezelfde zijn. De verschillen uiten zich onder meer in de wijze van fabricage en in de snelheid van bariumnalevering. Bij de geperste katode b.v. gaat deze nalevering sneller dan bij de andere types; dientenge-

volge vertoont deze katode een sterkere verdamping.

De geperste katode is vooral ontwikkeld als vlakke katode, met de bedoeling, te geraken tot een produkt dat zich leent tot massafabricage. De geïmpregneerde katode kan in allerlei vormen, b.v. als vlakke of als cilindrische katode, worden gemaakt. De mogelijkheden in de vormgeving en in de afmetingen zijn hier uitermate groot. Ook deze katode is geschikt om in grote aantallen te worden gemaakt. Het is moeilijk, op dit ogenblik een voorkeur uit te spreken, mede doordat andere eigenschappen bij deze beoordeling niet verwaarloosd mogen worden.

Behalve het probleem der nalevering van barium mag hier ook genoemd worden de kwestie van de afsluiting tussen het emitterende lichaam en de gloeidraad welke zorg draagt voor de verhitting van de katode. De geïmpregneerde katode leed in de oorspronkelijke vorm aan emissie van katode naar gloeidraad; voor de meeste typen van vlakke katodes is deze moeilijkheid overwonnen in een nieuwe uitvoering, die in deel III zal worden beschreven.

Indien men van één der drie types katodes: L-katode, geperste katode of geïmpregneerde katode, in een bepaalde buis gebruik wil maken, zullen de genoemde eigenschappen, met wellicht nog andere, bepalen welk type gekozen zal worden. Het is te verwachten dat deze keuze voor verschillende toepassingen verschillend zal kunnen uitvallen.

⁴⁾ P. P. Coppola en R. C. Hughes, Proc. Inst. Rad. Engrs. **44**, 351, 1956 (no. 3).

⁵⁾ R. Levi, J. appl. Phys. **24**, 233, 1953.

⁶⁾ R. Levi, Le Vide **9**, no. 54, 1954, blz. 284.

⁷⁾ R. Levi, J. appl. Phys. **26**, 639, 1955.

II. DE GEPERSTE KATODE

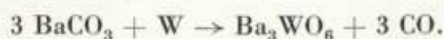
door R. C. HUGHES *) en P. P. COPPOLA **).

621.385.032.213.13

Het elektronenemitterende deel van de „geperste katode” bestaat uit een lichaam dat geperst wordt van een poedervormig mengsel van een wolfram-molybdeenlegering en barium-calciumaluminaat. Deze laatste verbinding is bij deze katode de bariumbron, waaruit het barium ten gevolge van reductie door het wolfram wordt verkregen. Na het persen volgt een kort stookproces, dat in het bijzonder van belang is voor de verwijdering van schadelijke gassen welke nog in de geperste massa aanwezig waren. Achtereenvolgens zullen worden besproken de chemische achtergrond van de keuze die voor de bestanddelen is gedaan, de fabricage van de geperste katode en ten slotte de emissie-eigenschappen.

Chemische beschouwingen over de keuze van de bariumbron en van het metaal

In de Inleiding is reeds opgemerkt dat barium-strontiumcarbonaat als uitgangsmateriaal in de kamer van de L-katode niet ideaal is. Een geperst mengsel van bariumcarbonaat en wolframpoeeder levert bij verhitting in het geheel geen barium. De reactie, die hier reeds bij 600 °C met een aanmerkelijke snelheid verloopt, wordt weergegeven door de vergelijking ¹⁾:



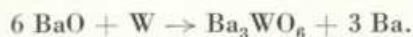
Een geperst mengsel van bariumoxyde en wolframpoeeder daarentegen levert barium bij temperaturen boven 1000 °C. Deze reactie, die ook verant-

*) Philips Laboratories, Irvington-on-Hudson, N.Y., U.S.A.

**) Voorheen bij Philips Laboratories, Irvington-on-Hudson, N.Y., U.S.A.

¹⁾ R. C. Hughes, P. P. Coppola en H. T. Evans, J. appl. Phys. **23**, 635, 1952.

woordelijk is voor de bariumnalevering in de L-katode, verloopt volgens de vergelijking:



Op deze wijze kan men een katode maken die werkt volgens het principe van de L-katode²⁾. De elektronenemissie is hier afkomstig van het wolfram, waarvan de uittreepotentiaal verlaagd is door de adsorptie van een monoatomaire zuurstof- en bariumlaag. Een zodanige katode, gemaakt dus door samenpersen van bariumoxyde en wolfram, heeft echter twee grote bezwaren:

- 1) Het bariumoxyde in de katode reageert zeer gemakkelijk met waterdamp en kooldioxyde uit de lucht. De montage zal dus moeten gebeuren onder zodanige omstandigheden dat deze gasen niet met de katode in contact kunnen treden. Dit vormt in de praktijk een grote moeilijkheid.
- 2) De reactiesnelheid tussen bariumoxyde en wolfram is bij de gewenste temperatuur, welke ligt in het gebied van 1000 °C tot ongeveer 1250 °C, ontoelaatbaar groot. Er wordt daardoor per tijdseenheid een veel te grote hoeveelheid barium gevormd. Katodes volgens deze uitvoering vertonen een zeer sterke verdamping en een korte levensduur.

Weliswaar zou men door het gebruik van molybdeen in plaats van wolfram een gunstiger reactiesnelheid kunnen verkrijgen, maar een oplossing voor het probleem van de slechte houdbaarheid aan de lucht is daarmee niet gevonden.

Behalve de moeilijkheden bij de verwerking, heeft men natuurlijk reeds dezelfde moeilijkheden van aantasting door waterdamp en kooldioxyde bij de vervaardiging van de katodes.

De eisen welke men moet stellen aan de verbinding die in combinatie met een geschikt metaal de bariumlevering zou moeten verzorgen, zijn:

- 1) Een zo gering mogelijke gasafgifte. Bij het pompproces kan dan de vereiste temperatuur snel worden ingesteld.
- 2) De afwezigheid van zuurstof welke aan de reactie zou kunnen deelnemen, behalve die welke in bariumoxyde aanwezig is.
- 3) Een goede stabiliteit aan de lucht. Waterdamp en kooldioxyde mogen niet worden opgenomen.
- 4) Vergeleken met bariumoxyde, moeten de reactiviteit en de verdamping gering zijn.

Het is gebleken dat de reactieprodukten van bariumoxyde en oxydes als aluminiumoxyde, siliciumdioxyde en boriumoxyde min of meer aan de ge-

stelde eisen voldoen²⁾. Een samenstelling bestaande uit 5 mol bariumoxyde en 2 mol aluminiumoxyde bleek het meest geschikt. In verband met de hier nog niet gestelde eis van een zo groot mogelijke elektronenemissie van de geperste katode bleek de toevoeging van een hoeveelheid calciumoxyde gewenst. Het voordeel van deze toevoeging werd het eerst aangetoond door R. Levi (zie I,⁷⁾) in de geïmpregneerde katode. Hoe deze gunstige invloed van het calciumoxyde moet worden verklaard, is op dit ogenblik nog niet duidelijk. Aangezien nog niet geheel bekend is hoe het calciumoxyde de eigenschappen van het bariumaluminaat wijzigt ten aanzien van de vier hierboven gestelde eisen, zullen alleen van het materiaal met de samenstelling 5 mol bariumoxyde en 2 mol aluminiumoxyde de eigenschappen in dit opzicht worden besproken.

Deze samenstelling vormt ongeveer een eutectisch mengsel van de verbindingen $\text{Ba}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ en BaAl_2O_4 ³⁾. Alleen de eerste van deze verbindingen wordt in voldoende mate door wolfram gereduceerd. De tweede verbinding is nuttig om de stabiliteit van het mengsel aan de lucht te vergroten en om het smeltpunt te verlagen. Bij de bereiding van het aluminaat blijkt smelten een voorwaarde te zijn voor een goede werking van de katode. Hierdoor worden gasresten zoveel mogelijk verwijderd. De hoeveelheid ongewenst gas die later uit de katode vrijkomt, is dan ook zeer gering.

De reactie waardoor tijdens het werken van de katode BaO ontstaat, kan men opvatten als een ontleding van het tribariumaluminaat:



Het bariumoxyde reageert verder met wolfram. Het gevormde monobariumaluminaat heeft geen verdere functie meer. Aan de tweede hierboven gestelde eis is hiermee voldaan.

De stabiliteit aan de lucht van het aluminaat met de samenstelling 5 mol bariumoxyde en 2 mol aluminiumoxyde blijkt uit fig. 1. In deze figuur is weergegeven de gewichtsvermeerdering welke poedervormig bariumoxyde, poedervormig aluminaat, een gestold pilletje van gesmolten aluminaat en ten slotte een geperste katode ondergaan wanneer zij blootgesteld worden aan lucht van 45% relatieve vochtigheid bij een temperatuur van 20 °C. Het is duidelijk dat poedervormig bariumaluminaat al zeer veel beter bestand is tegen water en kooldioxyde uit de lucht dan het poedervormige bariumoxyde, terwijl het gestolde aluminaatpilletje vrijwel niet

²⁾ R. C. Hughes en P. P. Coppola, J. appl. Phys. **23**, 1261, 1952.

³⁾ N. A. Toropov en F. Ya. Galakhov, Doklady Akad. Nauk S.S.S.R. **82**, 69, 1952.

meer in gewicht toeneemt. Bij de katode ten slotte, waar dit aluminaat zich tussen de afzonderlijke wolframkorrels bevindt, is een gewichtsvermeerdering zelfs na 1000 uur niet aantoonbaar.

Ten slotte het probleem van de reactiviteit van het bariumaluminaat en de verdamping van bariumoxyde uit dit materiaal. Het blijkt dat een geperst

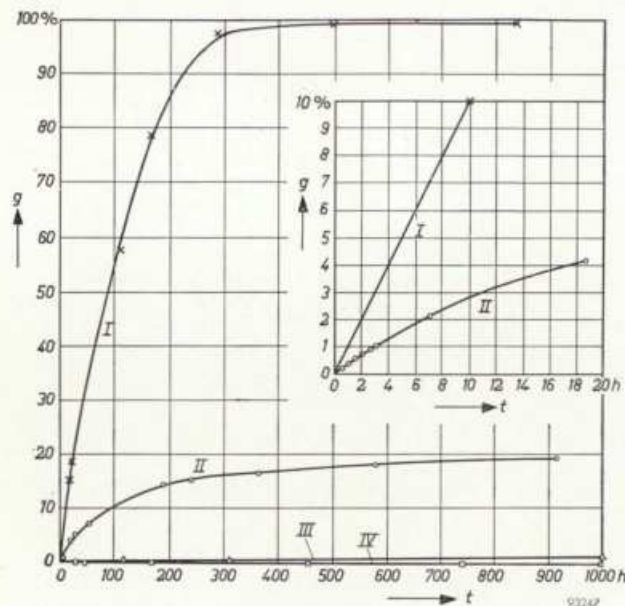


Fig. 1. Houdbaarheid aan de lucht, van de geperste katode en van verschillende hiervoor te gebruiken emitterende materialen. Uitgezet is de relatieve gewichtsvermeerdering g als functie van de tijd t . I poedervormig bariumoxyde, II poedervormig aluminaat, III pilletje van gesmolten aluminaat, IV geperste katode.

mengsel van wolframpoeier en poeder van aluminaat ($5 \text{ BaO} : 2 \text{ Al}_2\text{O}_3$) bij verhitting reageert op een wijze die voor een katode nog niet geheel bevredigend is. Bij een temperatuur van 1130°C ontwijkt uit dit mengsel per seconde weliswaar een hoeveelheid barium die minder dan $1/100$ bedraagt van die welke men verkrijgt van een equivalent mengsel van wolfram en bariumoxyde, maar desondanks is de verdamping nog te groot. Behalve met de chemische eigenschappen van het systeem, hangt dit gedrag ook samen met de vrij grote porositeit van de wolframmatrix. Men kan deze porositeit niet goed verder verkleinen door persen alleen, terwijl sinteren op hoge temperatuur in verband met de katode-eigenschappen niet geoorloofd is. Een oplossing moest dus langs chemische weg gevonden worden.

Het bleek uit thermodynamische beschouwingen dat van een wolfram-molybdeenlegering een langzame bariumproduktie kon worden verwacht. De experimenten hebben deze verwachting bevestigd. We bespreken dit nu nader.

De evenwichtsdruk van bariumdamp boven het systeem van een bariumverbinding en een reduce-

rend metaal kan met thermochemische methodes berekend worden ⁴⁾⁵⁾. Vervolgens kan de maximale verdampingssnelheid van het barium uit dit systeem worden afgeleid uit de evenwichtsdruk. Men kan de reactie tussen het bariumaluminaat en het reducerende metaal denken te verlopen in twee stappen: 1) de dissociatie van het aluminaat, waarbij bariumoxyde ontstaat, en 2) de reductie van het bariumoxyde, waarbij het barium wordt gevormd.

Eerst zal de bariumproduktie worden besproken. De reactie welke hiervoor zorg draagt, kan worden voorgesteld door de vergelijking:



Hierin stelt M het reducerende metaal voor (voor de eenvoud tweewaardig genomen), terwijl de indices v en g betekenen dat de stof in vaste, resp. in gasvormige toestand aan de reactie deelneemt. Wanneer slechts één stof als gas aan de reactie deelneemt, zoals in het hierboven genoemde geval, kan de evenwichtsdruk worden afgeleid uit de vergelijking:

$$\Delta G_T = -RT \ln P_{\text{Ba}} = -4,575 T^{10} \log P_{\text{Ba}}.$$

Hierin stelt ΔG_T de verandering in vrije enthalpie voor die bij deze reactie optreedt; hij is uitgedrukt in calorieën. R is de gasconstante, T de absolute temperatuur. De bariumdruk P_{Ba} is gemeten in atmosferen. De verandering in de vrije enthalpie kan worden geschreven als:

$$\Delta G_T = \Delta H - T\Delta S,$$

waarin voor de verandering ΔH in enthalpie welke bij de reactie plaatsheeft, en voor de entropieverandering ΔS in goede benadering de waarden bij 298°K kunnen worden genomen, die in tabellen zijn te vinden ⁶⁾.

Wat de dissociatie van tribariumaluminaat ($\text{Ba}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) betreft, deze verloopt onder de vorming van bariumoxyde en monobariumaluminaat, terwijl het monoaluminaat (BaAl_2O_4) kan dissociëren, waarbij bariumoxyde en aluminiumoxyde worden gevormd. Bij beide reacties treedt een dissociatiewarmte ⁷⁾ op, welke bij de berekening van de uiteindelijke bariumdruk bij de enthalpieverandering wordt opgeteld. De verandering in entropie bij de dissociatie wordt verwaarloosd. Uit de dissociatie-

⁴⁾ A. H. White, J. appl. Phys. **20**, 856, 1949.

⁵⁾ E. S. Rittner, Philips Res. Rep. **8**, 184, 1953.

⁶⁾ F. D. Rossini, D. D. Wagman, W. H. Evans, S. Levine en I. Jaffe, Nat. Bureau of Standards, Circular no. 500, 1952.

⁷⁾ De waarden van de dissociatiewarmten worden gegeven door R. B. Peppler en E. S. Newman, J. Res. Nat. Bur. Standards **47**, 439, 1951.

warmte van het tribariumaluminaat kan ook de bariumoxydedruk worden berekend.

De berekening van de verdampingssnelheid van barium en bariumoxyde uit de evenwichtsdruk P (in mm Hg) gebeurt met de uit de kinetische gas-theorie bekende formule:

$$Q = 0,0583P \sqrt{\frac{M}{T}},$$

waarin Q voorstelt de hoeveelheid verdampend materiaal in gram per cm^2 en per sec, T de absolute temperatuur, en M het moleculaire

uitgezet de verdamping van geperste pillen van W-Mo-legeringen van verschillende samenstelling met bariumaluminaat van de samenstelling $5 \text{ BaO} \cdot 2 \text{ Al}_2\text{O}_3$. Tevens zijn in de grafiek vermeld de berekende dampdrukken van barium voor de mengsels met zuiver molybdeen en zuiver wolfram, berekend in de onderstelling dat het verdampingsprodukt uitsluitend uit Ba bestaat.

Uit de figuur blijkt dat de vermeerdering van de verdamping welke wordt waargenomen als wolfram aan molybdeen wordt toegevoegd, evenredig is met de molaire wolframconcentratie. Men mag aan-

Tabel I. Berekende verdampingssnelheid van barium en bariumoxyde uit verschillende geperste mengsels. Temperatuur 1400 °K.

Systeem	Druk in 10^{-6} mm Hg		Verdampingssnelheid in $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{h}$		Gedrag als elektronenemissor
	Ba	BaO	Ba	BaO	
W + BaO	80	6	5200	420	Emitteert, geringe levensduur
Mo + BaO	1	6	65	420	Emitteert, matige levensduur
W + $\text{Ba}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	0,5	0,14	33	10	Emitteert, matige levensduur
Mo + $\text{Ba}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	0,009	0,14	0,6	10	Emitteert niet
W + BaAl_2O_4	0,0008	0,0011	0,05	0,08	Emitteert niet
Mo + BaAl_2O_4	0,00002	0,0011	0,001	0,08	Emitteert niet

gewicht van de desbetreffende stof. Q is klaarblijkelijk de grootst mogelijke verdampingssnelheid uit de katode: deze wordt bereikt als in de geperste poreuze massa de evenwichtsdruk zich instelt en als geen belemmering van de damp plaatsheeft bij het naar buiten stromen.

De resultaten van de berekening voor de twee aluminaten BaAl_2O_4 en $\text{Ba}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ met de metalen wolfram en molybdeen zijn weergegeven in tabel I. Tevens is hierin vermeld hoe een geperst mengsel van de genoemde stoffen zich als katode gedraagt. Verondersteld is nog dat steeds het normale wolframaat BaWO_4 of molybdaat BaMoO_4 werd gevormd. Uit de tabel blijkt duidelijk dat molybdeen veel minder reactief is dan wolfram. Verder valt op dat wolfram, geactiveerd door tribariumaluminaat, bij verhitting wel elektronen emitteert, maar als katode geen goede levensduur heeft. Dit hangt samen met een vrij sterke verdamping, hetgeen ook opvalt als men deze vergelijkt met die van een L-katode bij dezelfde temperatuur.

Op grond van het bovenstaande mocht worden verwacht dat een vermindering van de verdamping zal optreden wanneer men het wolfram leegert met molybdeen. Dat deze verwachting inderdaad blijkt uit te komen, kan men zien in fig. 2. Hier is

nemen dat het verdampingsprodukt in het geval van zuiver molybdeen vrijwel geheel bariumoxyde is, terwijl de vermeerdering door het wolfram uit barium bestaat. Het is theoretisch niet moeilijk aan te tonen dat de bariumproduktie evenredig met het wolframgehalte van de wolfram-molybdeenlegering moet stijgen (zie I, ⁴)).

Het materiaal dat ten slotte gekozen werd voor het persen van katodes, bestond uit 10 gew. %

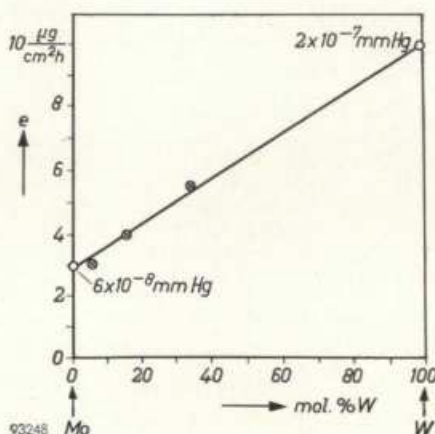
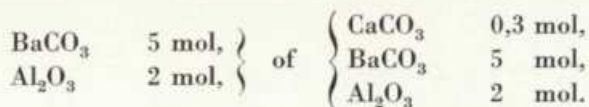


Fig. 2. Verdampingssnelheid e van barium en bariumoxyde uit geperste katodes van een wolfram-molybdeenlegering, als functie van het wolframgehalte in de legering.

bariumaluminaat met een moleculaire verhouding van bariumoxyde tot aluminiumoxyde van 5 tot 2, en 90 gew.% van een wolfram-molybdeenlegering welke 25 gew.% wolfram bevatte. Met deze combinatie werden katodes verkregen die een zeer goede stabiliteit aan de lucht vertoonden, een minimumhoeveelheid gas bevatten, een snelle activering en een grote emissie met een lange levensduur te zien gaven, en waarvan de barium- en bariumoxydeverdramping binnen redelijke grenzen bleef. De emissie was echter aanmerkelijk kleiner dan die van de L-katode. Zoals reeds werd opgemerkt, vergrootte toevoeging van CaO de emissie aanzienlijk, tot dicht bij de waarde die voor de L-katode geldt.

De fabricage van de geperste katode

Voor de bereiding van het benodigde aluminaat wordt uitgegaan van bariumcarbonaat, calciumcarbonaat en aluminiumoxyde. De stoffen worden afgewogen en zorgvuldig gemengd in de verhouding:



Het mengsel wordt aan de lucht zo hoog verhit dat het smelt. Wanneer het weer is afgekoeld, wordt het fijngezeefd, gezeefd en afgesloten van de lucht bewaard.

Het metaalpoeder wordt zeer zorgvuldig met het aluminaatpoeder gemengd in de gewichtsverhouding 9 : 1 en afgesloten van de lucht bewaard tot het ogenblik dat het persen moet plaatsvinden. Het persen kan op verschillende manieren gebeuren, naar gelang van de vorm waarin de katode verkregen moet worden en van de wijze waarop hij in de houder bevestigd wordt. Hier zal een methode beschreven worden welke op een goedkope wijze tot goede resultaten heeft geleid. De vlakke katode, welke aldus werd gemaakt, had een cirkelvormig emitterend vlak met een diameter van 3 mm. Het emitterende lichaam was direct in de cilindervormige houder van molybdeen geperst. In deze houder kon tevens de gloeidraad, welke voor de verhitte van de katode nodig is, worden aangebracht. In fig. 3 is een dergelijke katode, bestemd voor gebruik in een bepaald soort katodestraalbuis, weergegeven.

Bij het persen brengt men eerst een bepaald volume van het boven beschreven aluminaat-metaalmengsel in het molybdeencilindertje. Dit cilindertje is in een matrijs aangebracht. Vervolgens wordt met een geschikt bovenstempel het mengsel met de vereiste druk van 11 ton/cm² samengeperst. Nadat het

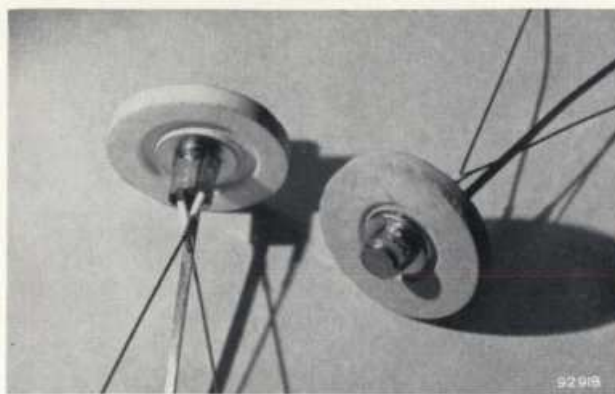


Fig. 3. Geperste katodes, gevat in cilindervormige houder van molybdeen. Het vooruitstekende emitterende oppervlak (3 mm diameter) is volmaakt vlak.

geheel uit het stempel is verwijderd, wordt de katode in vacuüm of nog beter in waterstof verhit op een temperatuur van ongeveer 1800 tot 1900 °C. Dit is een zeer essentieel onderdeel van de katodefabricage. Het aluminaat smelt, waarbij gassen ontwijken en een goede verdeling tussen de metaalkorrels wordt verkregen.

De molybdeencilinder is op eenvoudige wijze vervaardigd uit een dunne plaat, die tot een cilinder is gebogen, zodanig dat tussen de randen een spleet overblijft. Bij het persen wordt het einde van de cilinder waar het poeder zich bevindt, wat naar binnen gedrukt. Hierdoor is na het verhitten een goede hechting van het geperste materiaal aan de houder verzekerd.

Het geperste oppervlak is goed vlak. Over de diameter van 3 mm bleek de afwijking van een plat vlak minder te zijn dan 3 μ .

De emissie-eigenschappen

Ten einde de emissie-eigenschappen van deze katodes vast te stellen, worden zij in een buis gemonteerd met op korte afstand een anode. De afstand tussen deze elektrodes wordt zo klein gekozen dat bij de later beschikbare spanning van b.v. 1000 V de verzadigingsstroom kan worden getrokken. De aldus gevormde diode wordt verbonden met een hoogvacuümpomp, welke de druk in de buis kan verlagen tot minder dan 10^{-6} mm Hg. In de buis is ook nog een gasbinder aangebracht, welke de gassen die nog vrijkomen als de buis reeds van de pomp is verwijderd, kan opnemen. De buis wordt gedurende een uur in een oven verhit tot een temperatuur van 450 °C. Na afkoeling wordt de katode verhit door spanning te leggen aan de gloeidraad. De temperatuur wordt in ongeveer 5 minuten geleidelijk opgevoerd tot 1200 °C. Vervolgens wordt de anode ontgast door hoogfrequentiever-

hitting, waarna een spanning van 300 V tussen katode en anode wordt aangelegd. Men neemt nu waar dat een stroom gaat vloeien, die snel aangroeit en na ongeveer 1 minuut constant wordt. Hierna wordt de gasbinder geactiveerd en de buis wordt van de pomp verwijderd door dichtsmelten van de glazen pompstengel. De emissie blijkt dan reeds ongeveer de helft te zijn van de maximale waarde, die na de hierop volgende korte inbrandperiode wordt bereikt.

Om de verzadigingsstroom te meten, kan men de anodespanning niet continu op een waarde van b.v. 1000 V houden. Hierdoor zou een te sterke verhitte van de anode optreden. Daarom worden 60 maal per seconde spanningsstoten toegevoerd die ongeveer 100 μ sec duren. Gelijktijdig wordt de spanning aan de diode in horizontale richting, en de stroom welke door de diode vloeit in verticale richting, op het scherm van een oscillograafbuis weergegeven⁸⁾. Fig. 4 toont dit verband tussen spanning en stroom voor verschillende katodetemperaturen. Hierbij is op de verticale as de stroomdichtheid uitgezet. De katode die bij deze proef werd gebruikt, bevatte Ba-Ca-aluminaat.

Voor zover men dit in verband met de buisconstructie heeft kunnen nagaan, zijn de stromen die bij constante spanning door de diode vloeien, even groot als die welke in fig. 4 zijn uitgezet en welke bij spanningsstoten werden verkregen.

In fig. 5 is uitgezet het verloop van de stroomdichtheid, gemeten bij een katodetemperatuur van 1020 °C en een anodespanning van 1000 V, als functie van de brandtijd. De verschillende krommen hebben betrekking op katodes geperst van bariumaluminaat ($5\text{BaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$) en verschillende W-Mo-legeringen. Bij zuiver wolfram is de levensduur te gering, hetgeen gepaard gaat met een te sterke verdamping. Bij toenemend molybdeengehalte

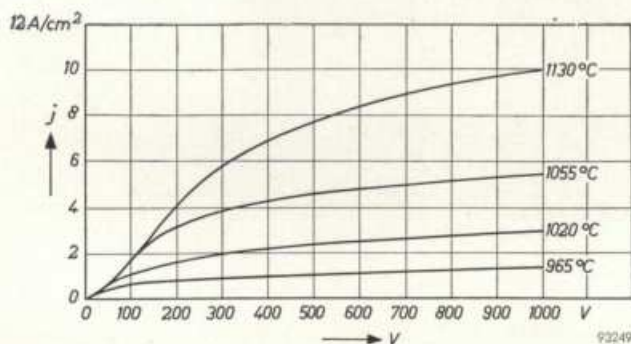


Fig. 4. Emissie van een geperste katode (met CaO), gemeten in een diode. Uitgezet is de stroomdichtheid j als functie van de aangelegde anodespanning V bij verschillende katodetemperaturen.

⁸⁾ R. Loosjes en H. J. Vink, Philips Res. Rep. 2, 190, 1947.

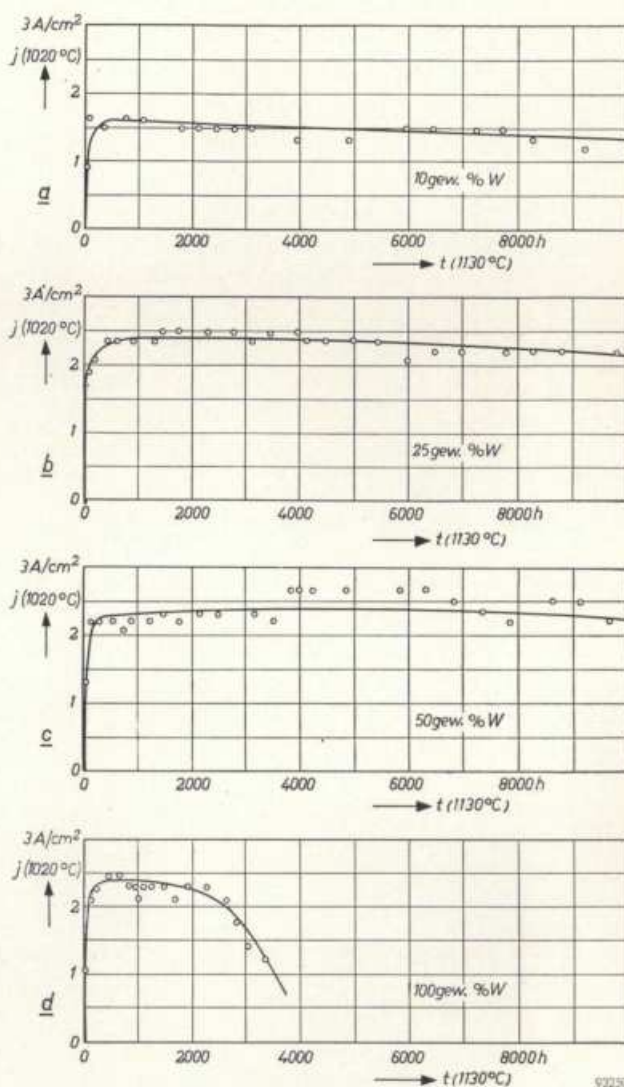


Fig. 5. Stroomdichtheid j van verschillende geperste katodes bij 1000 V anodespanning, als functie van de brandtijd t . a) Legering van 10 gew. % W, rest Mo. b) Dito met 25 gew. % W. c) Dito met 50 gew. % W. d) Zuiver W.

Alle vier katodes waren vervaardigd met bariumaluminaat ($5\text{BaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$); tijdens de op de abscis uitgezette branduren bedroeg de katodetemperatuur 1130 °C, voor elke meting werd de temperatuur verlaagd tot 1020 °C.

daalt de verdamping en stijgt de levensduur. Aanvankelijk blijft de stroomdichtheid dezelfde, maar bij een te groot molybdeengehalte daalt de emissie, om bij 100 % Mo verwaarloosbaar klein te worden. Op grond van deze resultaten is de legering bestaande uit 75 gew. % molybdeen en 25 gew. % wolfram ten slotte toegepast (fig. 5, kromme b).

De gunstige invloed van de toevoeging van calciumoxyde op de emissie blijkt uit fig. 6. De temperatuur was hier 1130 °C.

De bepaling van de constanten in de formule van Richardson leverde $\varphi_0 = 1,7$ V en $A = 1,8$ A/cm²graad² voor het bariumaluminaat, en $\varphi_0 = 1,7$ V en $A = 2,4$ A/cm²graad² voor het bariumcalciumaluminaat.



Fig. 6. Stroomdichtheid j van geperste katodes bij 1000 V anodespanning, als functie van de brandtijd t . Brand- en meettemperatuur beide 1130°C . A bariumaluminaat, B barium-calciumaluminaat.

Het verloop van het activeringsproces kan bij lage temperatuur zichtbaar worden gemaakt door een elektronenoptische afbeelding van de katode op een fluorescerend scherm te maken. Het resultaat is voor een temperatuur van 950°C weergegeven in fig. 7. Bij deze temperatuur gaat het acti-

veringsproces natuurlijk veel langzamer dan bij de gebruikelijke temperatuur van 1200°C .

Proeven met deze katode, uitgevoerd in een buis welke tot een druk van 10^{-3} mm Hg was gepompt en waarin de druk vervolgens, nadat de buis was afgesmolten, met behulp van een gasbinder was verlaagd tot ongeveer 10^{-6} mm Hg, lieten zien dat vrijwel dezelfde emissie werd bereikt als onder zeer veel gunstiger omstandigheden aan de pomp. Men zal daarom mogen verwachten dat in buizen, gepompt met roterende tweetraspompen, welke ongeveer een druk van 10^{-3} mm Hg kunnen bereiken, geperste katodes zullen kunnen worden toegepast.

Tevens is gebleken dat blootstellen aan de lucht van een geactiveerde katode weliswaar een tweede activeringstijd vraagt, maar deze tijd is niet langer dan de eerste en de stroomdichtheid die hierna wordt bereikt, is dezelfde als vóór de toelating van de lucht. Dit proces kan nog vier maal worden herhaald voordat een invloed op de activeringstijd en de emissie merkbaar wordt.

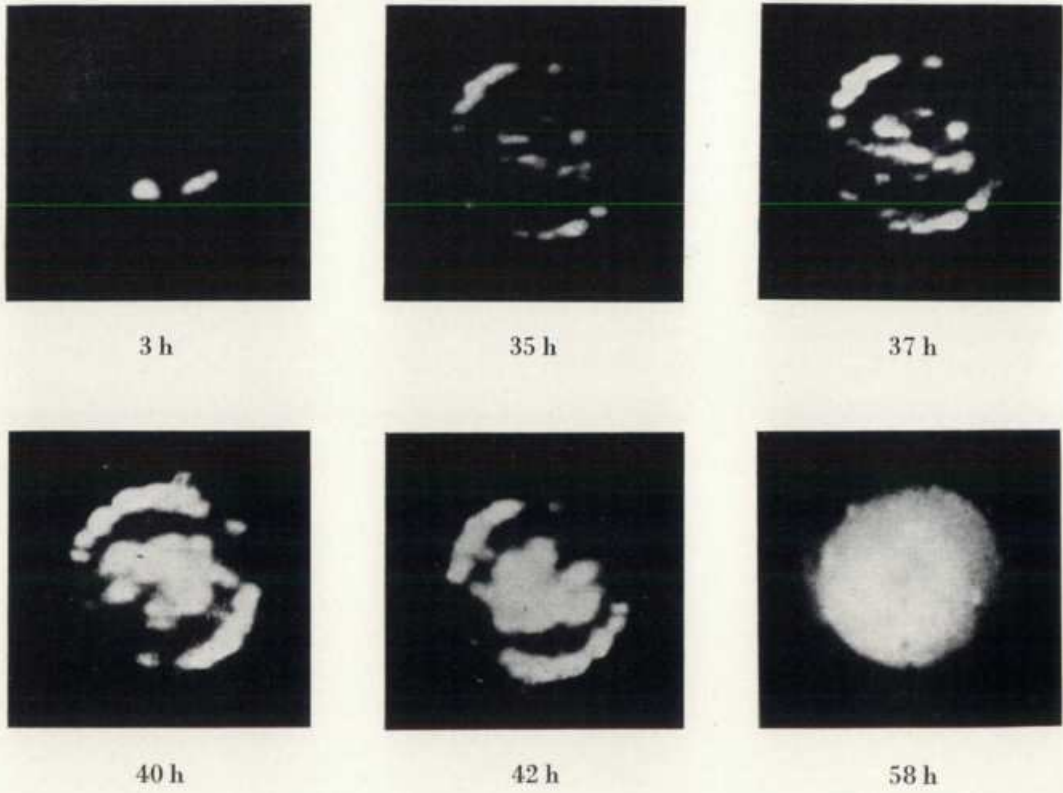


Fig. 7. Elektronenoptische afbeelding van de emitterende katode op een fluorescentiescherm, opgenomen in verschillende fasen van het (bij 950°C uitgevoerde en derhalve veel langzamer dan normaal verlopende) activeringsproces. Bij elke foto is de activeringstijd vermeld.

III. DE GEÏMPREGNEERDE KATODE

door R. LEVI *).

621.385.032.213.13

De geïmpregneerde katode wordt gemaakt door een poreus wolframlichaam, waarvan één of meer vlakken elektronen moeten emitteren, te impregneren met een geschikte bariumverbinding in gesmolten toestand. In een van de eerste versies van dit type katode werd geïmpregneerd met een mengsel van gewone en basische bariumaluminaten. Deze katodes vertoonden inderdaad de gewenste voordelen boven de L-katode wat betreft het fabricageproces, maar de emissie was aanmerkelijk kleiner. Bij een latere uitvoering, die hieronder besproken wordt, is dit bezwaar overwonnen doordat calciumoxyde is toegevoegd. Het meest in het oog springende kenmerk van deze katode is dat hij in allerlei vormen en grootten kan worden vervaardigd.

De keuze van de bariumbron en van het metaal

Bij de L-katode bereikt het activerende materiaal, barium en bariumoxyde, het emitterende oppervlak via de poriën in het poreuze wolframlichaam. Hierbij ondervindt deze stroom van atomen en moleculen een zekere weerstand, welke afhangt van de afmetingen van de poriën. De weerstand is in het algemeen groter naarmate de poriën kleiner zijn. Men heeft daardoor met de grootte der poriën binnen zekere grenzen de nalevering en ook de verdamping van barium en bariumoxyde in de hand. Bij de geperste katode konden de poriën niet voldoende klein gemaakt worden om een overmatige verdamping te voorkomen. Op andere wijze moest daarom een vermindering van de bariumnalevering worden verkregen. Dit is, zoals in II werd beschreven, gelukt door in plaats van zuiver wolfram een wolfram-molybdeenlegering te gebruiken. Bij de geïmpregneerde katode gaat men uit van wolframlichamen, die door toepassing van een geschikte persdruk en sintertemperatuur bij de fabricage uit poedervormig wolfram een porositeit hebben van slechts 17%. Dit betekent dat van deze lichamen 83% van het volume uit wolframmetaal bestaat en de rest uit poriën en gaten tussen de wolframkorrels. (Bij de L-katode is de porositeit meestal 27%, en bij de geperste katode zelfs 40%.) Door het gebruik van dit weinig poreuze wolfram in combinatie met bariumaluminaat ($5\text{BaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$), en nog beter met barium-calciumaluminaat ($5\text{BaO} \cdot$

$3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$), kon een geschikte nalevering van barium en bariumoxyde worden verkregen.

De beschouwingen over het bariumaluminaat, die gegeven zijn bij de bespreking van de geperste katode met betrekking tot de stabiliteit aan de lucht, de geringe gasafgifte, de geringe reactiviteit en de afwezigheid van extrazuurstof, gelden natuurlijk evenzo bij toepassing van dit materiaal in de geïmpregneerde katode. De toevoeging van calciumoxyde veroorzaakt een vergroting van de emissie en een vermindering van de verdamping.

De fabricage van de geïmpregneerde katode

Het aluminaat wordt bereid op de wijze zoals beschreven is bij de geperste katode. Het is echter gebleken dat bij de geïmpregneerde katode de samenstelling van het CaO -bevattende aluminaat beter anders gekozen kan worden. Bij de bereiding hiervan gaat men uit van de samenstelling:

CaCO_3	3 mol,
BaCO_3	5 mol,
Al_2O_3	2 mol.

(De hoeveelheid CaCO_3 mag tussen wijde grenzen variëren; de benedengrens is 0,3 mol.)

Meestal wordt het aluminaat na het smelten als gestolde pillen afgesloten van de lucht bewaard en korte tijd voor het gebruik tot poeder gestampt.

Het poreuze wolframlichaam, waarvan later één of meer vlakken dienst zullen doen als elektronenbron, krijgt eerst de vereiste afmetingen. Tevens wordt aan de vlakken waarvoor dit nodig is, de geschikte afwerking gegeven. Wolfram met een porositeit van 17% laat zich niet volgens gangbare methodes bewerken. Er is echter door de auteur een techniek ontwikkeld die het mogelijk maakt toch dit dichte materiaal in zijn uiteindelijke vorm te brengen met voorgeschreven afmetingen. Deze techniek bestaat uit het vullen van de poriën met een geschikt materiaal, waarvoor veelal koper wordt gebruikt. In deze toestand kan het wolfram gedraaid, gefreesd, geslepen en gepolijst worden. Als de uiteindelijke vorm verkregen is, wordt het koper weer verwijderd, b.v. door verdamping. Een beschrijving van dit proces is reeds eerder in dit tijdschrift gegeven¹⁾.

*) Philips Laboratories, Irvington-on-Hudson, N.Y., U.S.A.

¹⁾ R. Levi, Een methode voor het bewerken van wolfram, Philips techn. T. 17, 234-238, 1955.

Het blijkt dat bij de porositeit van 17% bijna alle poriën nog verbinding met elkaar hebben, zodat het poreuze lichaam nagenoeg geheel met koper kan worden gevuld. Men kan proberen de porositeit nog kleiner te maken, hetgeen een voordeel zal kunnen betekenen bij de toepassing als katode; de verdamping van barium en bariumoxyde zal daardoor geringer worden. Men stuit dan echter spoedig op moeilijkheden bij de bewerking, doordat bij te geringe porositeit niet alle holten in het materiaal meer onderling in verbinding staan, en sommige holten derhalve bij het impregneren niet met koper worden gevuld. Ook voor de katode is het optreden van zulke holten ongunstig, omdat een geringere hoeveelheid aluminaat kan worden opgenomen, waardoor de levensduur wordt verkort.

De wijze waarop het katodelichaam na de bewerking met het aluminaat wordt geïmpregneerd, hangt af van zijn vorm. In het algemeen wordt het poedervormige aluminaat in direct contact met het lichaam gebracht, waarna men het verhit tot een temperatuur boven het smeltpunt van het aluminaat. Meestal gebeurt dit in een wolfram- of molybdeenoventje, dat of direct door stroomdoorgang of door geïnduceerde hoogfrequente stromen wordt verhit. In sommige gevallen zal het lichaam zelf op een dezer wijzen op voldoende hoge temperatuur gebracht kunnen worden. In vloeibare toestand zuigt dan het aluminaat in het poreuze wolfram. Aanvankelijk gebeurde het impregneerproces in vacuüm, later is gebleken dat deze bewerking met voordeel in waterstof kan worden uitgevoerd. Bij 1 atm waterstof is de impregneringstijd veel minder kritisch en de activeringstijd van de katode wordt aanzienlijk korter, nl. in plaats van ongeveer 70 uur slechts 3 à 6 uur, indien het aluminaat CaO bevat.

Alvorens de katode nu in een buis kan worden gebruikt, dient het geïmpregneerde wolframlichaam op een geschikte wijze in een drager te worden bevestigd. Als materiaal hiervoor komt in hoofdzaak molybdeen in aanmerking. Men kan geen materiaal kiezen dat sterk reducerend zou werken op het aluminaat, bovendien mag het zelf bij de gebruikstemperaturen van de katode, van ongeveer 1000 °C tot 1300 °C, slechts een verwaarloosbare verdamping vertonen. Het is gebleken dat molybdeen een zeer geschikt materiaal voor dit doel is. De drager zal ook de gloeidraad moeten bevatten, die de katode op de gewenste temperatuur moet brengen. Deze gloeidraad, welke van wolfram wordt vervaardigd, is meestal met behulp van aluminiumoxyde van de drager geïsoleerd.

Het zal van de toepassing afhangen hoe het wolframlichaam in de drager wordt bevestigd. We beschouwen eerst een vlakke katode met cirkelvormig oppervlak. In vele gevallen zal men kunnen volstaan met het vastfelsen van het wolframschijfje in een molybdeenbusje, dat van binnen voorzien is van een steunrandje (fig. 1). Door een geschikt gekozen conische vorm van het

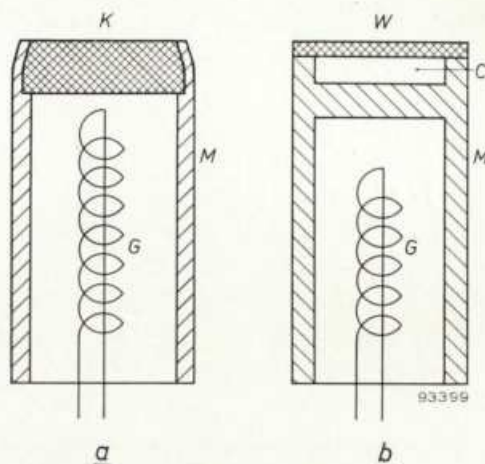


Fig. 1. a) Eenvoudigste wijze om een vlakke geïmpregneerde katode *K* in een houder te bevestigen. De houder bestaat uit een busje *M* van molybdeen, met een steunrandje waarin het katodeschijfje (d.i. een poreus, met aluminaat geïmpregneerd, wolframlichaam) wordt vastgefeld. In het busje wordt de gloeidraad *G* geschoven. b) Ter vergelijking is de constructie van de L-katode afgebeeld. Het poreuze wolframlichaam *W* vormt hier de afsluiting van een kamertje *C*, waarin een voorraad van een geschikte bariumverbinding is opgeslagen.

schijfje kan voorkomen worden dat de felsrand boven het emitterende vlak uitsteekt. Achter het emitterende schijfje kan dan de gloeidraad in het molybdeenbusje worden geschoven. Een voordeel van deze constructie is de gunstige warmteoverdracht van de gloeidraad naar het emitterende vlak.

Bij gebruik van een vlakke katode, b.v. in een televisieweergeefbuis, zal men deze wijze van bevestiging niet kunnen toepassen. In een dergelijke buis moet men nl. rekening houden met de mogelijkheid van een potentiaalverschil tussen de gloeidraad en het eigenlijke katodedeel, en om te voorkomen dat geëmitteerde elektronen de gloeidraad bereiken, als deze positief is ten opzichte van de eigenlijke katode, moeten deze beide van elkaar worden afgesloten. Dit is trouwens ook gewenst omdat verdamping van barium of bariumoxyde naar de gloeidraad in die buizen tot ongewenste verschijnselen kan leiden.

Om de genoemde afsluiting te verkrijgen, kan men de vlakke katode zeer geschikt als volgt vervaardigen.

Behalve het geïmpregneerde wolfraamschijfje en het molybdeenbusje, dat eventueel gevormd kan zijn door rondzetten van een plaatje, zodanig dat een zeer smalle spleet overblijft, is nog een molybdeenplaatje vereist. Dit plaatje is een weinig hol van vorm. De drie delen worden op elkaar gelegd, zoals fig. 2 laat zien, waarna zij met behulp van een weerstandslas in één bewerking aan elkaar worden verbonden. Blijkbaar is de eis die hier aan de las tussen plaatje en busje wordt gesteld, niet zeer

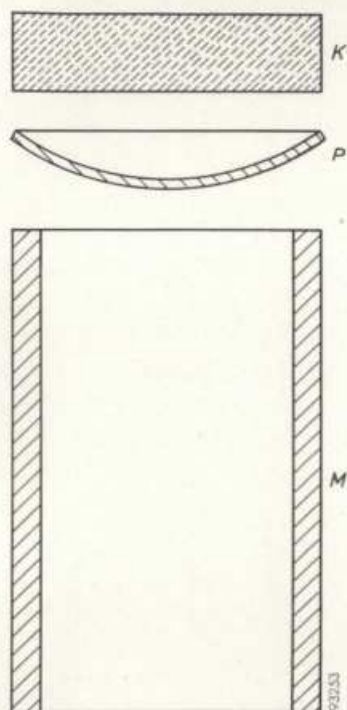


Fig. 2. Constructie van een vlakke geïmpregneerde katode waarbij de gloeidraad en de elektronenemitterende oppervlakken van elkaar zijn afgesloten. Het katodeschijfje K, het molybdeenbusje M en het afsluitende molybdeenplaatje P worden in één bewerking door een weerstandslas aan elkaar verbonden.

streng. In tegenstelling met de las bij de L-katode, hoeft hij niet geheel dicht te zijn; mechanische sterkte is voldoende. Met voordeel wordt de diameter van het plaatje enige tienden millimeter groter gekozen dan de diameter van de molybdeen-cilinder. Het is namelijk gebleken dat barium en bariumoxyde een zekere afstand over het metaaloppervlak kunnen bewegen vóór zij weer verdampen. Deze afstand is bij de hier gebruikte temperaturen enkele tienden millimeter, zoals volgt uit het werk van Rittner c.s. betreffende wolfram²⁾ en molybdeen³⁾. Maakt men nu de kleinste mogelijke weg tussen katodelichaam en gloeidraad groter dan deze migratielengte, dan kan het barium de gloeidraadruimte niet bereiken. Ook als de las niet geheel dicht is, kan men aldus voorkomen dat barium, dat van de zijkant van het wolframlichaam over het molybdeen migreert, de gloeidraadruimte bereikt.

Vormt het emitterende oppervlak niet een plat vlak, maar is het b.v. hol, dan zal men soortgelijke constructies kunnen toepassen. Zodanige katodes ziet men in fig. 3.

Bij cilindrische katodes zal wederom het emitterende wolframlichaam het eerst worden vervaardigd. Dit gebeurt op de reeds beschreven wijze, door bewerking van het poreuze wolfram na impregneren met koper. Er zijn nu verschillende mogelijkheden om dit lichaam op de drager te bevestigen. In fig. 4 is een uitvoeringsmogelijkheid weergegeven. Een vergelijking met de overeenkomstige constructie voor de L-katode leert dat vooral voor kleine uitvoeringen de geïmpregneerde katode gunstiger

²⁾ E. S. Rittner, R. H. Ahlert en W. C. Rutledge, J. appl. Phys. 28, 156, 1957 (no. 2).

³⁾ E. S. Rittner en R. H. Ahlert, wordt gepubliceerd in J. appl. Phys.

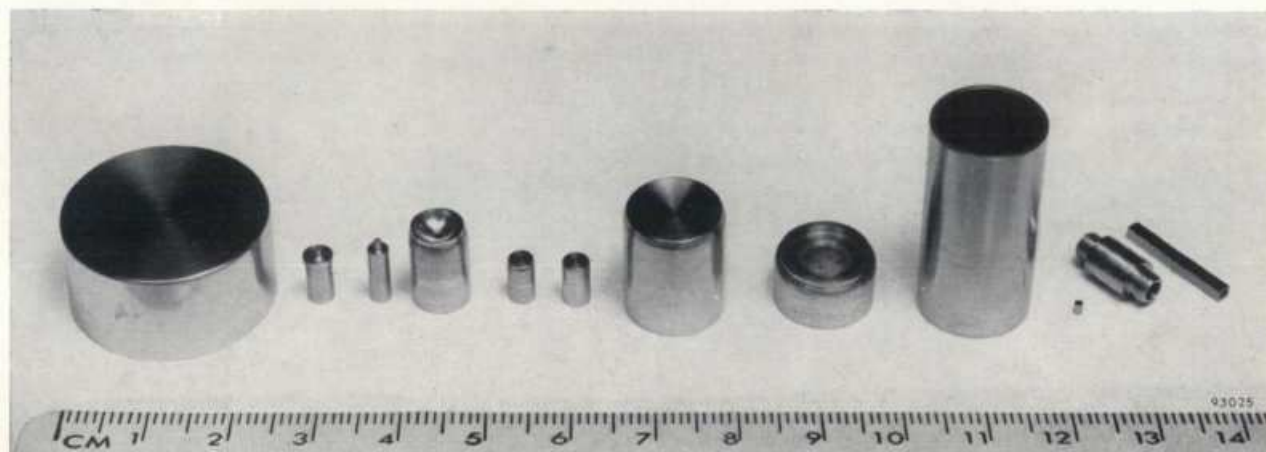


Fig. 3. Een aantal geïmpregneerde katodes, met een vlak, hol of cilindrisch emitterend oppervlak. Men ziet dat dit katodetype in zeer uiteenlopende vormen en afmetingen kan worden vervaardigd.

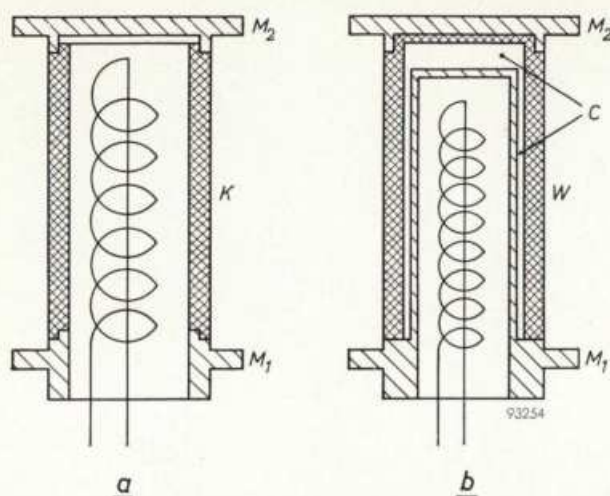


Fig. 4. a) Bevestiging van een cilindrische geïmpregneerde katode K in een houder (M_1 , M_2) van molybdeen. b) Overeenkomstige constructie van een cilindrische L-katode, ter vergelijking. Het kamertje C is gevuld met de bariumverbinding.

kan worden gemaakt. Ook de dimensionering van de gloeidraad kan gunstiger gekozen worden, omdat hiervoor meer ruimte beschikbaar is.

Kort geleden is gevonden dat op het wolfram, gesinterd tot de vereiste grote dichtheid en met aluminaat geïmpregneerd, nog bewerkingen zoals draaien en boren kunnen worden toegepast. Vrij grote stukken katodemateriaal zijn aldus te vervaardigen in de vorm van staven, waaraan naderhand de gewenste vorm en afmetingen kunnen worden gegeven. Deze vereenvoudiging in de katode-fabricage is zeer aantrekkelijk, daar er minder stappen bij nodig zijn en de kostbare vacuüminstallatie overbodig is. De met aluminaat geïmpregneerde staven zijn echter minder gemakkelijk te bewerken dan wolfram geïmpregneerd met koper. Daardoor komt deze techniek niet in aanmerking voor katodes van zeer ingewikkelde vorm. Zoals vanzelf spreekt, zijn katodes van de eenvoudigste vorm, met een plat emitterend oppervlak van matige grootte, ook te vervaardigen door wolframpoe-der direct in een mal te persen, het te sinteren tot een porositeit van 17 %, en het vervolgens met de aluminaten te impregneren.

Het is vooral de grotere vrijheid in de vormgeving waardoor de geïmpregneerde katode zich gunstig onderscheidt van de geperste. Bovendien gaat bij eerstgenoemde het verdampen langzamer.

De emissie-eigenschappen

De emissie-eigenschappen werden bestudeerd in een vlakke diode met een voldoende kleine afstand tussen katode en anode, op een wijze zoals reeds bij de geperste katode is beschreven (zie II, blz. 232).

Nadat de buis in een oven gedurende 1 uur op 450°C verhit is geweest, wordt er stroom door de gloeidraad gestuurd en de katodetemperatuur geleidelijk verhoogd tot 1250°C . Indien de katode naderhand op een hogere temperatuur zal moeten werken, dient hij in deze fase van het proces een temperatuur te krijgen die ten minste 50°C hoger is dan de werkt temperatuur.

Als de druk in de buis, na het wegpompen der vrijgekomen gassen, weer tot zijn oorspronkelijke waarde is teruggefallen, wordt de anode door hoog-frequente inductiestromen verwarmd. Vervolgens wordt een gelijkspanning tussen katode en anode aangelegd, terwijl de katodetemperatuur 1250°C is. Men neemt waar dat een stroom gaat lopen, die binnen enkele minuten zijn maximum bereikt. Nu wordt weer de gasbinder geactiveerd en vervolgens kan de buis van de pomp worden verwijderd. Volledige activering wordt hierna in enkele uren bereikt door de katode te gloeien op 1225°C . Het aanleggen van een anodespanning is hierbij niet noodzakelijk.

De meting van de emissie wordt ook hier uitgevoerd met spanningsstoten van ongeveer $100\ \mu\text{sec}$, verkregen door een condensator periodiek over de diode te ontladen. In fig. 5 is te zien hoe de zo verkregen stromen afhangen van de aangelegde spanning. In verticale richting is de stroomdichtheid

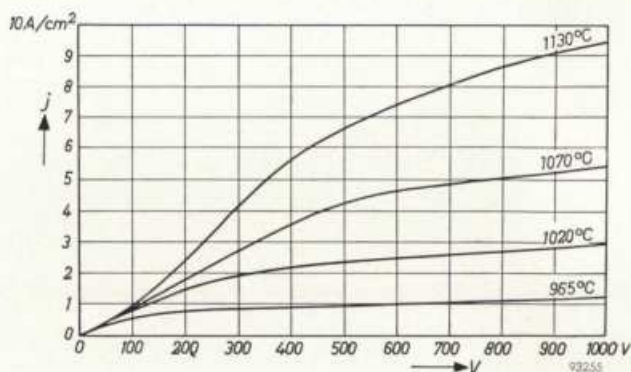


Fig. 5. Stroomdichtheid j van een geïmpregneerde katode, gemeten in een diode, als functie van de anodespanning V bij verschillende katodetemperaturen.

uitgezet. Fig. 6 laat zien dat de toevoeging van calciumoxyde leidt tot een aanzienlijke verhoging van de emissie. Berekent men uit de gevonden stroomdichtheid de waarden van φ_0 en A in de vergelijking van Richardson, dan vindt men in dit geval: $\varphi_0 = 1,67\text{ V}$, $A = 2,5\text{ A/cm}^2\text{graad}^2$ ⁴⁾.

⁴⁾ De waarde van A , berekend uit de getallen zoals opgegeven in R. Levi, J. appl. Phys. **26**, 639, 1955, is 20% groter. Uit verder werk van E. S. Rittner, W. C. Rutledge en R. H. Ahlert (dat gepubliceerd zal worden in J. appl. Phys.) blijkt, dat de effectieve emitterende oppervlakte dit zelfde bedrag groter is dan oorspronkelijk was berekend, doordat een gedeelte van de uit molybdeen bestaande houder eveneens emitteert.

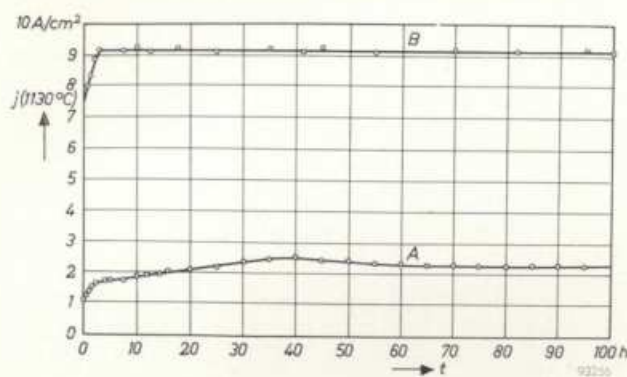


Fig. 6. Verbetering van de emissie van de geïmpregneerde katode, bij vervanging van het bariumaluminaat (kromme A) door barium-calciumaluminaat (kromme B). De grafiek toont het oplopen van de stroomdichtheid tijdens de activering na het afsmelten van de buis.

Wanneer een geactiveerde katode met de lucht in aanraking is geweest, is de emissie verdwenen. Het blijkt echter dat na een hernieuwd activeringsproces, uitgevoerd op de wijze zoals hierboven is beschreven, de katode in dezelfde emissietoestand komt als hij was vóór de inwerking van de lucht, en dat de tijd die hiervoor nodig is, niet langer is dan vereist was voor de eerste activering. Dit proces kan zelfs enkele malen herhaald worden voordat men enige invloed op de reactiveringstijd en de emissiestroom bemerkt.

Samenvatting van I, II en III. De L-katode, die een aantal jaren geleden in het Philipslaboratorium te Eindhoven is ontwikkeld, bestaat uit een poreus wolframlichaam waarvan het emitterende oppervlak is bedekt met een laag barium- en zuurstofatomen. De voortdurende verdamping van barium gedurende het werken van de katode wordt gecompenseerd doordat barium wordt nageleverd door een verbinding die zich in een kamertje achter het poreuze wolframlichaam bevindt. De L-katode kan continu met zeer grote stroomdichtheden worden belast, zijn metalliek emitterend oppervlak is robuust en kan zeer glad en met nauwe toleranties wat betreft de afmetingen worden gemaakt; de katode heeft een zeer lange levensduur (enige duizenden uren), herstelt gemakkelijk na vergiftiging en is zeer goed bestand tegen ionenbombardement. De toepassing van de L-katode in buizen wordt echter beperkt door de betrekkelijk lange tijd die nodig is voor het ontgassen en activeren, door de moeilijkheden bij het hermetisch afsluiten van het kamertje dat de bariumleverende verbinding bevat, en door beperkingen in de afmetingen.

Onderzoekingen in het Philipslaboratorium te Irvington hebben geleid tot de ontwikkeling van twee nieuwe types naleveringskatodes, die volgens hetzelfde principe als de L-katode werken (en die derhalve dezelfde algemene eigenschappen wat betreft de elektronenemissie bezitten), maar die de nadelen daarvan vermijden. Het eerste type is een geperste katode; deze wordt vervaardigd door een mengsel van een poeder-vormige wolfram-molybdeenlegering en barium-calciumaluminaat (gewichtverhouding 9 : 1) samen te persen, en de geperste massa te verhitten. Het molybdeen gehalte van de legering (75

Verdamping en levensduur

In tegenstelling tot de L-katode is bij de geïmpregneerde katode de verdampingssnelheid sterk afhankelijk van de tijd; zij neemt met de tijd t af volgens $t^{-1/2}$. De grote beginsnelheid kan in bepaalde toepassingen schadelijk zijn, maar ze heeft ook twee voordelen: zowel een snelle activering wordt erdoor in de hand gewerkt als een herstel na vergiftiging (meestal het ernstigst in het begin van de levensduur). Van de temperatuur hangt de verdamping, in het voor de praktijk belangrijke gebied, af volgens $\exp(-Q/kT)$, waarin Q de warmte is van de reactie die barium produceert; deze warmte is, in de gebruikelijke energiemaat, ruwweg 4 eV.

Indien de snelheid waarmee Ba en BaO aan het oppervlak komen, nooit daalt beneden de waarde die nodig is om het oppervlak volledig met barium bedekt te houden, is de levensduur van de katode bepaald door de hoeveelheid activerend materiaal die erin aanwezig is, en door het tempo waarin barium tijdens het werken door verdamping verloren gaat. De levensduur hangt daardoor af van de werkt temperatuur; bij 1130 °C heeft een geïmpregneerd wolframlichaam van 1 mm dik een levensduur van meer dan 15 000 uur.

⁵⁾ Zie het in ⁴⁾ aangehaalde artikel van E. S. Rittner, W. C. Rutledge en R. H. Ahlert.

gewichtsprocent) is essentieel om de verdampingssnelheid van barium en bariumoxyde tot het gewenste peil omlaag te brengen. Het tweede type is een geïmpregneerde katode, die wordt vervaardigd door een poreus wolframlichaam te impregneren met gesmolten barium-calciumaluminaat. Een geschikte nalevering van barium wordt verkregen door wolfram met een porositeit van 17% te gebruiken. (De porositeit van het wolframlichaam van de L-katode is 27%, die van de legering in de geperste katode 40%.) Een speciale techniek voor het bewerken van het wolfram maakt het mogelijk, de geïmpregneerde katode gemakkelijk in zeer uiteenlopende vormen en afmetingen, ook uiterst kleine, te vervaardigen.

De geperste en geïmpregneerde katode hebben beide veel kortere tijden voor de ontgassing en de activering nodig dan de L-katode en kunnen gemakkelijker worden gefabriceerd. Een vlakke geperste katode is speciaal geschikt voor massaproductie, maar ook een massafabricage van de geïmpregneerde katode zal geen grote moeilijkheden met zich meebrengen, terwijl het laatstgenoemde type verreweg de ruimste mogelijkheden voor de ontwerper biedt. Het calciumgehalte van het aluminaat vergroot in beide types katodes de elektronenemissie aanzienlijk, door een mechanisme dat nog niet volledig is opgehelderd. Deze katodes kunnen verscheidene malen gedurende hun levensduur aan de lucht worden blootgesteld en na herstel van het vacuüm worden gereactiveerd. De elektronenemissie van alle drie types naleveringskatodes (L-katode, geperste, en geïmpregneerde katode) maakt deze geschikt voor toepassing in buizen waarin gedurende enige duizenden uren grote stroomdichtheden, hetzij continu of in impulsen, worden geëist.

EEN SPIEGELCONDENSORLAMP VOOR 8 mm-PROJECTIE

621.326.732:778.55

Bij het zoeken naar een oplossing van het probleem hoe 8 mm-filmprojectoren te maken die een grote lichtstroom op het projectiescherm werpen, was tot voor kort de tendentie der ontwerpers daartoe lampen van groot vermogen te gebruiken, méér dan te zoeken naar verbeteringsmogelijkheden in de condensoroptiek. Het gebruik van dergelijke lampen maakte het uiteraard nodig dat voor een passende koeling gezorgd werd, hetgeen meebracht dat omvang, gewicht en prijs van de projectoren toenamen.

Bij nadere beschouwing van dit probleem in het Philipslaboratorium te Eindhoven kwam men tot de conclusie dat het in de aanhef genoemde doel óók bereikt moest kunnen worden met een lamp van gering vermogen, door de gangbare constructie van de condensoroptiek te verlaten en gebruik te maken van een gloeilampje met een gedeeltelijk verzilverde ballon van zodanige vorm dat deze als spiegelcondensor kan fungeren. Experimenten¹⁾ bevestigden de juistheid hiervan.

Het bedoelde gloeilampje, hetwelk slechts 50 watt verbruikt (8 V, 6,25 A), is afgebeeld in fig. 1. Fig. 2 toont er een horizontale doorsnede van ter hoogte van het filament. Het lampje heeft een ballon waarvan het achterste gedeelte de vorm van een omwentelingsellipsoïde heeft en van een uitwendig aangebrachte spiegelende laag is voorzien. In het eerste brandpunt van deze elliptische spiegel bevindt zich het filament, een horizontale enkelvoudige spiraal. Het wordt door de spiegel vergroot afgebeeld in het tweede brandpunt, hetwelk ca. 12 mm voor de voorste glaswand ligt. Het filmvenster — $4,45 \times 3,35$ mm groot in 8 mm-projectoren — kan nu, zonder dat verdere optische hulpmiddelen nodig zijn, ongeveer ter plaatse van dit tweede brandpunt aangebracht worden. Het wordt aldus voldoende gelijkmatig verlicht en wel door een lichtbundel van zo grote openingshoek als nodig is om een projectieobjectief van de gebruikelijke lichtsterkte (relatieve opening $f:1,5$) juist te vullen²⁾. Verder is, dank zij het geringe vermogen, geforceerde koeling niet nodig.

Alvorens op de details van een en ander in te gaan, wijden we een korte algemene beschouwing

aan de twee wijzen waarop met behulp van een condensorsysteem een projectievenster — en daarmee het projectiescherm — intensief en gelijkmatig verlicht kan worden.

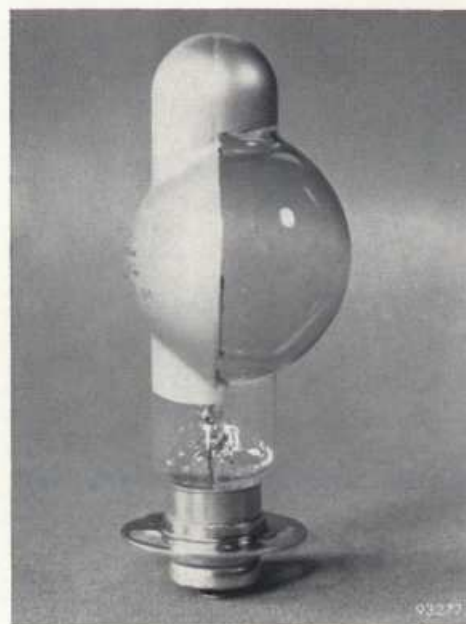


Fig. 1. Spiegelcondensorlamp voor 8 mm-projectie. Totale hoogte van het lampje 94 mm.

Bij de eerste wijze van opstellen (fig. 3), die in de regel toegepast wordt bij de projectie van lanternplaatjes, beeldt de condensor de lichtbron af op de projectielens en bevindt het diapositief zich zeer dicht achter de condensor. Men bereikt met deze wijze van opstellen een grote gelijkmatigheid in de verlichting van het diapositief.

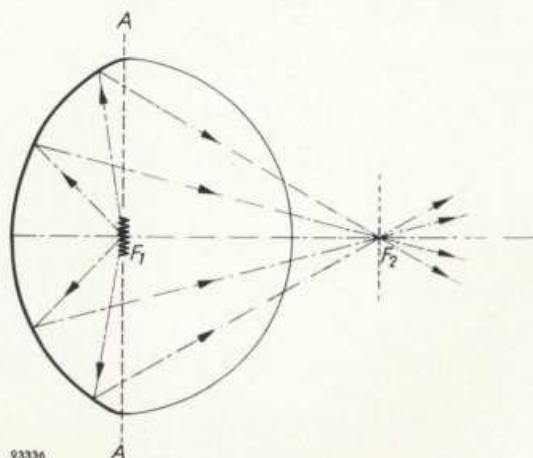


Fig. 2. Horizontale doorsnede door de spiegelcondensorlamp ter hoogte van het filament. Het gedeelte links van de lijn AA is een deel van een ellips met brandpunten F_1 en F_2 .

¹⁾ Van F. L. van Weenen, die ook het probleem gesteld had.

²⁾ Elliptische condensorspiegels zijn voor andere doeleinden (normaalfilmprojectie, vliegveld- en toneelverlichting) al eerder gebruikt. Zie b.v. R. Sewig, Handbuch der Lichttechnik, deel II, blz. 710, Springer, Berlijn 1938, en F. W. J. Schweigman, Diss. Groningen 1946.

Tracht men dit (fysisch gezien ideale) systeem toe te passen voor de projectie van beeldjes van zeer kleine afmetingen (in het bijzonder 8 mm-kinofilm), dan zou men — indien men tenminste geen grote lichtverliezen aan het filmvenster wenst te accepteren — ook condensorlenzen en lichtbronnen van dienovereenkomstig kleine afmetingen moeten construeren. Afgezien van de vraag of dit technisch mogelijk is, zou dit echter geen geslaagde oplossing zijn, daar hierbij de warmteproducerende lichtbron zo dicht bij condensor en film zou komen te staan dat deze laatste door de hitte beschadigd zouden worden ³⁾.

De andere wijze van opstellen, die in de regel in filmprojectoren wordt toegepast, is geschetst in fig. 4. Hierbij wordt de lichtbron afgebeeld in het projectievenster. Ook bij deze oplossing verliest men zo weinig mogelijk van het door de condensor opgevangen licht, maar de verlichting van het projectievenster is slechts voldoende gelijkmatig indien — aangenomen een ideale afbeelding — ook de lichtbron een oppervlak van ongeveer constante helderheid heeft. Bovendien dient ter beperking

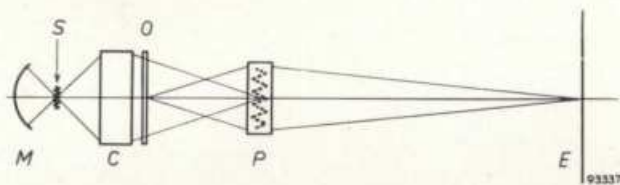


Fig. 3. Stralengang in een projector voor lantaarnplaatjes. De lichtbron *S* wordt afgebeeld op het projectieobjectief *P*. Het lantaarnplaatje *O* staat direct achter de condensor *C* en wordt aldus zeer gelijkmatig verlicht. De hulpspiegel *M* bewerkstelligt dat een grotere fractie van de door de lamp uitgezonden lichtstroom nuttig gebruikt wordt, maar speelt geen rol ten aanzien van de beeldvorming. Het projectieobjectief beeldt *O* af op het scherm *E*.

van het lichtverlies dit oppervlak nagenoeg gelijkvormig te zijn met het filmvenster.

Bij beide geschetste systemen is het in principe mogelijk de condensorlenzen te vervangen door een spiegel. Ten aanzien van de ruimtehoek in welke het door de lichtbron uitgezonden licht wordt opgevangen, biedt dat zelfs voordelen. Het construeren van spiegels met een openingshoek van 180° is zeer goed mogelijk; bij lenzen kan men zonder in hoge kosten te vervallen niet veel verder komen dan 90° . Bovendien vertoont een spiegel uiteraard geen chromatische aberratie. Het praktische gebruik van spiegelcondensors is echter beperkt gebleven tot 35 mm-projectoren (met als lichtbron een kool-

boog), daar deze condensors alleen bevredigend werken wanneer hun afmetingen groot zijn ten opzichte van de lichtbron. Bij gebruik van gloeilampen gecombineerd met een los daarvan staande spiegel, moet men hierbij niet rekenen met de afmetingen van het filament maar met die van de ballon: indien men werkt met een spiegel die niet tevens groot is ten opzichte van de ballon, passeert een grote fractie van het licht na de re-

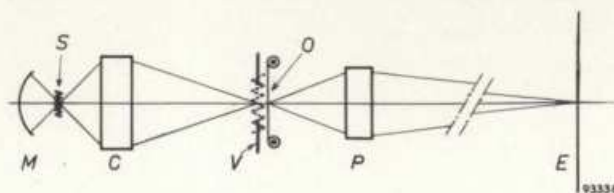


Fig. 4. Stralengang in een filmprojector. Hier wordt de lichtbron *S* door de condensor *C* afgebeeld in de nabijheid van het filmvenster *V*. Voor de hulpspiegel *M* geldt hetzelfde als in het geval van fig. 3. *P* beeldt de film *O* af op *E*.

flectie aan het spiegeloppervlak nog een of twee maal de ballonwand en ondergaat daarbij door de breking richtingsveranderingen, die de beeldvorming verstoren. Om deze reden vooral was tot nu toe in 8 mm-projectoren een spiegelcondensor onbruikbaar. Een tweede nadeel dat aan spiegelcondensors kleefte, is gelegen in het feit dat op den duur de spiegel vuil wordt.

Uit de hierboven gegeven beschrijving van het spiegellampje valt direct te concluderen dat de zojuist genoemde bezwaren daarvoor niet gelden. De spiegel is direct op de ballon aangebracht, zodat vuil worden uitgesloten is, en verder speelt de breking van het licht in de ballon hier geen rol van betekenis.

De lichtstroom die bij gebruik van het spiegellampje, in combinatie met een projectieobjectief met de voor 8 mm-projectie gangbare relatieve opening ($f:1,5$), op het scherm valt, bedraagt ca. 75 lumen. Berekent men hoe groot deze lichtstroom is bij gebruik van een gloeilamp van dezelfde helderheid in combinatie met een normale condensoroptiek met openingshoek van 90° en een zelfde projectieobjectief als boven, dan komt men — evenals bij het vorige geval de totale reflectieverliezen op 50% schattend — ongeveer op hetzelfde bedrag. Gaat men anderzijds na welke fractie van de door de lamp uitgezonden lichtstroom op het scherm valt (zie tabel I), dan vindt men voor deze twee gevallen onder de genoemde omstandigheden resp. 4 en $2\frac{1}{2}\%$. De vermogens van lampen die in beide gevallen een gelijke lichtstroom op het scherm werpen, verhouden zich ongeveer omgekeerd als de genoemde percentages.

³⁾ Bij projectie van 35 mm-film is aan dit bezwaar nog te ontkomen door als lichtbron een kwiklamp te gebruiken. Zie Philips techn. T. 4, 2-9, 1939.

In werkelijkheid is het vermogen van het spiegel-lampje nog geringer dan een vergelijking met andere lampen op grond van bovenstaande percentages zou doen vermoeden, en wel omdat de helderheid van de gloeidraad groter is. Dit is mogelijk door het gebruik van een lage voedingsspanning: de gloeidraad is relatief dik, waardoor bij gegeven levensduur een hogere temperatuur toegelaten kan worden dan bij lampen voor hoge spanning. Dank zij dit geringe vermogen kan een met de nieuwe lamp uitgeruste projector voorzien worden van een relatief lichte transformator, hetgeen, evenals het ontbreken van een koelsysteem, ertoe bijdraagt dat het gewicht van een dergelijke projector klein blijft.

De gelijkmatigheid in de verlichting van het filmvenster is o.a. te danken aan de volgende

Tabel I. De fractie van de door de lamp uitgezonden lichtstroom welke het projectiescherm bereikt bij gebruik van een lenzencondensor met openingshoek van 90° (afmetingen van het filament daarbij aangepast!) resp. bij gebruik van de beschreven spiegelcondensorlamp, in beide gevallen in combinatie met een projectieobjectief met een relatieve opening van $f:1.5$. De getallen hebben niet meer dan globale betekenis, maar demonstrenen toch duidelijk de enorme winst die bij gebruik van de nieuwe lamp verkregen wordt dank zij de grote openingshoek van de condensorspiegel.

	lens- condensor	spiegel- condensor- lamp
Door lamp uitgezonden lichtstroom	100%	100%
Hier van valt naar de zijde van de condensor	60%*)	50%
De condensor vangt op (de openingshoek van de condensor is 90° ondersteld, voor de spiegel lamp is gerekend met 160°)	30%	48%
De vlinder laat hiervan b.v. de helft door Het filmvenster laat hiervan ongeveer $\frac{1}{3}$ deel door **)	15%	24%
De totale reflectieverliezen aan lensoppervlakken, wand van de lamp en condensorspiegel bedragen ca. 50% ***). Op het scherm valt dus uiteindelijk	5%	8%
	2½%	4%

*) Dank zij de meestal gebruikte hulpspiegel, vgl. fig. 3 en 4.

**) Alleen wanneer de afmetingen van het filament passen bij de eigenschappen van de condensor, mag hier in beide kolommen met dezelfde fractie gerekend worden.

***) In de opstelling met de spiegel lamp vermoedelijk minder!

oorzaken. In de eerste plaats wordt weliswaar het snijpunt van het filament met de as van de ellipsoïde scherp afgebeeld in het tweede brandpunt, maar de overige delen worden door de verschillende delen van het spiegeloppervlak op ietwat verschillende plaatsen — d.w.z. door de gehele spiegel onscherp — afgebeeld (coma). Hiernaast treedt uiteraard ook diepte-onscherpte op. Ter plaatse van het tweede brandpunt ligt derhalve wel het punt waar de lichtbundel zijn kleinste doorsnede heeft, maar er is geen sprake van een scherpe afbeelding van de gloeidraad. Uit het voorgaande kan tevens geconcludeerd worden dat deze gelijkmatigheid alleen dan op het projectiescherm teruggevonden wordt wanneer het projectieobjectief de gehele, van het filmvenster uitgaande, lichtbundel omvat.

Daar bij de spiegellamp lichtbron en condensor één zijn, is het noodzakelijk bij de produktie een grote constantheid van afmetingen na te streven. De lamp is voorzien van een centreervoet P15 (vgl. fig. 1). In een standaardopstelling wordt iedere lamp afzonderlijk gejusteerd, zodat het filament een bepaalde voorgeschreven stand ten opzichte van de buitenhuls van de voet heeft; daarna pas wordt de buitenhuls aan de binnenhuls gesoldeerd⁴⁾.

Vergelijkt men de eigenschappen die een met deze spiegellamp uitgeruste projector voor 8 mm-film ongeveer zal kunnen hebben, met die van de beste bestaande projectoren, dan blijkt dat het aantal op het scherm vallende lumen per kg apparaatgewicht en ook het aantal lumen per watt 2 à 3× zo groot worden, terwijl deze verbetering niet verkregen is door een zeer dure lamp te gebruiken. Integendeel, de prijs van de lamp per lumen-uur is lager dan die van andere gloeilampen voor 8 mm-projectoren. Hetzelfde zal, in nog sterkere mate, voor de „prijs per lumen” van een dergelijke projector zelf gelden.

P. M. van ALPHEN,
M. BIERMAN.

⁴⁾ Vgl. Th. J. J. A. Manders, Philips techn. T. 8, 72-81, 1946. In dit artikel worden ook vele andere problemen betreffende projectielampen besproken.



DE SLINGER VAN FOUCAULT IN HET GEBOUW VAN DE VERENIGDE NATIES TE NEW YORK

door J. A. HARINGX en H. van SUCHTELEN.

525.36.002.2

Onder de geschenken die door de leden-staten zijn aangeboden ter verfraaiing van het gebouw van de Verenigde Naties, bevindt zich een door Nederland aangeboden monumentale slinger van Foucault, die is opgehangen in de hall van de grote vergaderzaal, en die door zijn beweging voortdurend de draaiing van de Aarde demonstreert.

In het hieronder volgende artikel vindt men een korte beschrijving van het ophang- en het aandrijfsysteem van deze slinger. De eis was gesteld hiervoor een constructie te vinden die zonder toezicht en onderhoud toch gedurende zeer lange tijd een goede werking zou waarborgen.

Op 7 december 1955 werd door Zijne Excellentie Mr. H. Luns, Minister van Buitenlandse Zaken, aan de voorzitter van de Assemblée van de Verenigde Naties uit naam van het Nederlandse volk een monumentale slinger aangeboden. De slinger is opgehangen in de hall die toegang geeft tot de grote vergaderzaal van de Assemblée, in het gebouw van de Verenigde Naties te New York, en wel boven de centrale kolom van de trap (zie fig. 1). Het betreft hier een zg. slinger van Foucault, die werd vervaardigd volgens een in het Natuurkundig Laboratorium van de N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken ontworpen constructie. Deze constructie is speciaal uitgewerkt met het oog op de eis dat de slinger zonder onderhoud of toezicht gedurende vele jaren ononderbroken zal moeten functioneren.

Een slinger van Foucault is in principe niets anders dan een, aan een lange draad opgehangen, gewicht (verder aan te duiden als de „bol”) het-

welk slingert in een verticaal plat vlak. Door de wijze van ophangen is het slingervlak ten opzichte van de Aarde echter niet gefixeerd, maar zal, ten gevolge van de aardrotatie, draaien om de verticaal door het ophangpunt. Op het noordelijk halfrond verloopt de draaiing in de richting N.O.Z.W., op het zuidelijk halfrond juist andersom. Men kan bewijzen¹⁾ dat voor een geïdealiseerd geval (zeer lange slinger, zeer kleine amplitude) de tijd T' waarin het slingervlak 360° is gedraaid, gegeven wordt door de formule:

$$T' = \frac{T}{\sin \varphi} \dots \dots \dots (1)$$

Hierin is T de omwentelingstijd van de aarde en φ de geografische breedte. Aan de polen is $T' = T$, aan de equator wordt $T' = \infty$, d.w.z. hier treedt geen draaiing op. In New York ($\varphi = 40^\circ 45'$) is

¹⁾ A. Sommerfeld, Vorlesungen über theoretische Physik, dl. I, Dieterich Verl., Wiesbaden 1952.



Fig. 1. De hall in het gebouw van de Verenigde Naties welke toegang geeft tot de grote vergaderzaal van de Assemblée. Boven de centrale kolom van de trap bevindt zich de slinger van Foucault, die door Nederland werd aangeboden.

$T' = 36$ uur 50 min. Verder blijkt uit de theorie dat de hoeksnelheid waarmee het vlak ten opzichte van de meridiaan draait, constant is.

Onder de zich in de praktijk voordoende omstandigheden geldt ²⁾ voor de omlooptijd de formule:

$$T'' = \frac{T}{\sin \varphi} \left(1 - \frac{3}{8} \frac{a^2}{l^2} \right) \dots \dots (2)$$

²⁾ Handbuch der Physik, dl. V, blz. 339, Springer, Berlijn 1927.

Hierin zijn a de amplitude en l de lengte van de slinger. Bij de slinger in het gebouw van de Verenigde Naties is l ongeveer $17\frac{1}{2}$ m en a ongeveer 80 cm. Met deze slingerlengte correspondeert een slingertijd van ca. $8\frac{1}{2}$ sec.

Probeert men een dergelijke slinger te construeren en daarmee de beroemde proef van Foucault (1851) na te doen, dan zal men aldaar bemerken dat de slinger, o.a. ten gevolge van onvolkomenheden

in de rotatiesymmetrie van de draadinklemming, na enige tijd een elliptische of zelfs cirkelvormige beweging gaat uitvoeren. Bij de aan te bieden slinger, die zonder toezicht permanent moest kunnen doorslingeren, mocht dit zg. „ellipsen” uiteraard niet optreden. Daar kwamen nog twee andere constructieve problemen bij. In de eerste plaats moest de zekerheid bestaan dat de draad niet na enige tijd door voortdurend heen en weer buigen zou breken, en in de tweede plaats moest een aandrijfsysteem worden ontworpen dat in staat zou zijn de slinger voldoende energie toe te voeren om het energieverlies te compenseren dat optreedt ten gevolge van de luchtweerstand.

Hoe het ellipsen op eenvoudige wijze kan worden verholpen, is aangegeven door Charron³⁾. Op een afstand l' onder het ophangpunt A (zie fig. 2a) bracht hij een in de ruimte gefixeerde ring B aan, met een binnendiameter die slechts weinig ($2d$) groter is dan de dikte van de ophangdraad. Zodra de uitwijking van de bol de waarde dl/l' overschrijdt, raakt de draad de ring en gaat het raakpunt als „ophangpunt” fungeren. Dit heeft ten gevolge dat de korte as van een eventueel aanwezige ellipsbaan snel kleiner wordt. Aan de hand van fig. 2b kan dit als volgt globaal worden verklaard.

Nemen we aan dat de draad, zolang deze de ring niet raakt, recht is, dan zal hij ter hoogte van de ring een ellips beschrijven die een, in de verhouding l'/l verkleinde, afbeelding van de ellipsbaan van de bol is. In de figuur is dit de kleine gestippelde ellips; hij wordt b.v. doorlopen in de richting van de pijl. De cirkel stelt de begrenzing van de uit-

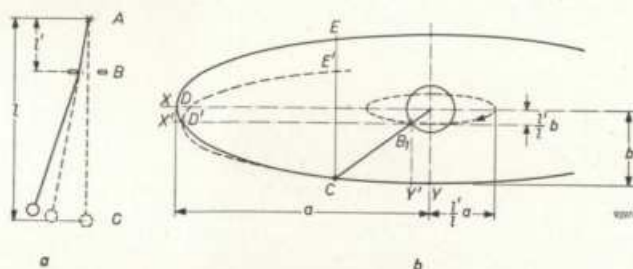


Fig. 2. a) Ophanging van slinger volgens Charron. Het ophangpunt bevindt zich bij A . De ring B , die een inwendige diameter heeft die slechts weinig groter is dan de diameter van de draad, verhindert dat de „bol” C een ellipsbaan gaat beschrijven.

b) De werking van de ring van Charron. Wanneer de slinger een ellips beschrijft met halve assen a en b , raakt de draad de ring b.v. in het punt B_1 . Indien de wrijving tussen ring en draad voldoende groot is, fungeert daarna B_1 enige tijd als „ophangpunt” en beschrijft de bol de ellips $CD'E'$ in plaats van de ellips CDE , die beschreven zou zijn wanneer de ring er niet was. De amplitude in de Y -richting is in een halve periode dus verminderd met de lengte EE' , die gelijk is aan $2bl'/l$.

³⁾ F. Charron, Bull. Soc. Astr. Fr. 45, 457, 1931.

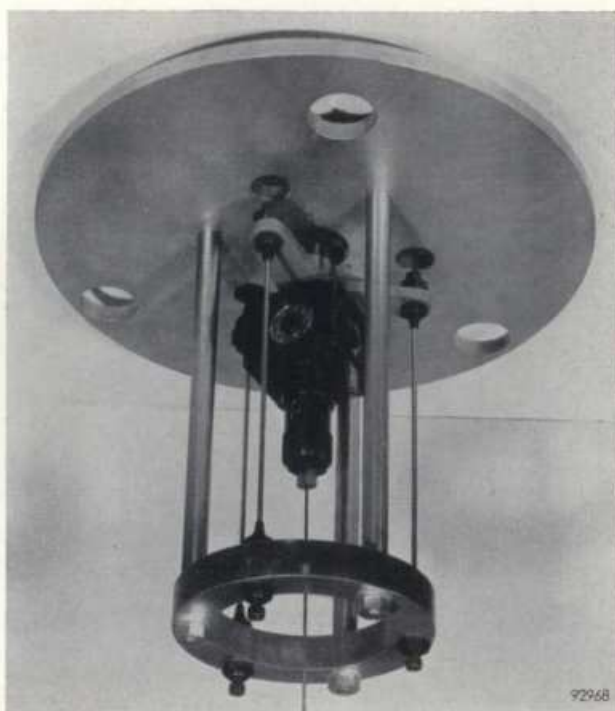


Fig. 3. Het uitgevoerde ophangstelsel.

wijking van de draad door de ring voor. Zodra de draad de ring raakt, fungeert het punt B_1 als ophangpunt. Neemt men aan dat de snelheid van de bol in de Y -richting op dat moment klein is, dan zal daarna de bol de ellips $CD'E'$ beschrijven, waarvan de assen langs de lijnen B_1X' en B_1Y' vallen. We zien dus dat de amplitude in de Y -richting bij het begin van de volgende halve slingering verminderd is met de afstand EE' , die ongeveer gelijk is aan $2bl'/l$. De relatieve vermindering per volle slingering bedraagt dan $\Delta b/b = 4l'/l$.

In het bovenstaande is stilzwijgend aangenomen dat, zolang de bol de baan $CD'E'$ beschrijft, de draad tegen de ring gedrukt blijft in het punt B_1 . In de regel zal de contactwrijving niet voldoende zijn om dit te bewerkstelligen. In werkelijkheid is $\Delta b/b$ dus kleiner dan hier berekend, maar dit neemt niet weg dat het aanbrengen van de ring toch een zeer effectief middel is om het ellipsen te bestrijden.

Charron leidde af dat door toepassing van deze constructie de omlooptijd ietwat verkort wordt. Hij vond dat deze tijd hierbij gegeven wordt door de formule:

$$T''' = \frac{T}{\sin \varphi} \left(1 - \frac{3}{8} \frac{a^2}{l^2} - \frac{4d}{\pi a} \right) \dots \quad (3)$$

Voor de te New York geplaatste slinger is een ophanging ontworpen die equivalent is met die van Charron, maar er constructief aanzienlijk van afwijkt. Fig. 3 toont een foto van deze construc-

tie en *fig. 4* geeft er een schema van. De door balken te ondersteunen bovenplaat *A* draagt via de drie staven *B* een ring *C*. Deze ring ondersteunt door middel van de drie ronde staafveren *D* het drie-armige juk *E*, waaraan het cardanscharnier *F* is bevestigd. Aan *F* hangt de draad met de bol. Het juk kan zich, door uitbuigen van de staafveren, radiaal verplaatsen over een afstand gelijk aan de radiale speling *s* tussen de pen *G* en de binnenkant van een in de bovenplaat aangebracht gat. Daar de staafveren verticaal verschuifbaar zijn en hun lengte nauwkeurig kan worden ingesteld, kan men zorgen dat het geheel de gewenste zijdelingse stijfheid heeft en tevens dat de pen

zich in de ruststand in het centrum van het gat bevindt.

Vergelijken we deze constructie met die van *fig. 2a*, dan valt op te merken dat het cardanscharnier overeenkomt met het punt van de draad dat zich bij Charron ter hoogte van de ring *B* bevindt. Het gat in de bovenplaat vervult hier de taak van die ring, zodat de speling *s* bij de nieuwe constructie equivalent is met de speling *d* bij de oude. Door toepassing van het cardanscharnier vermijdt men de wrijving en de buiging die de draad bij Charron's constructie ter hoogte van de ring te verduren heeft. Hierdoor is de kans op verkorting van de levensduur van de draad door slijtage en ten gevolge van de wisselende buigspanning, zeer klein geworden. De drie staafveren dragen, juist als het draadstuk *AB* bij Charron, het gewicht *G'* van de bol enz. en oefenen (via het juk) op het uitgeweken scharnier een naar het centrum gerichte kracht uit, die evenredig is met de uitwijking. Bij een uitwijking *u* ondervindt het eerder genoemde punt van Charron's draad een dergelijke kracht ter grootte $G'u'/l'$. Door geschikte dimensionering van de staafveren kan men bij de nieuwe constructie de terugdrijvende kracht eveneens deze grootte geven.

Bij het dimensioneren van de staafveren dient bedacht te worden dat de zijdelingse stijfheid *c* hiervan niet alleen bepaald wordt door de afmetingen en de elasticiteitsmodulus, maar ook in hoge mate afhangt van de drukkracht $\frac{1}{3} G'$. De lengte *l'* is hier een fictieve grootte, die niet overeenkomt met de lengte van de staafveren maar gelijk is aan $G'/3c$.

De genoemde zijdelingse stijfheid wordt voor dit geval (parallel verschuivende uiteinden) gegeven door de formule

$$c = \frac{P}{l_1} \frac{\frac{1}{2} ql_1}{\lg \frac{1}{2} ql_1 - \frac{1}{2} gl_1} \quad \dots \quad (4)$$

Hierin zijn $q^2 = P/EI$ en $P = \frac{1}{3} G'$. Verder zijn nog: *l*₁ de lengte van de staafveren, *E* hun elasticiteitsmodulus en *I* hun buigingstraagheidsmoment.

Als ophangdraad werd een draad gekozen van hard getrokken niet-roestend staal met een diameter van 2,5 mm. Aan beide einden is de draad centraal vastgeklemd door een conus van gehard staal die van een inwendige vertanding is voorzien. De conus is diametraal ingezaagd en wordt in een bijpassende ring vastgetrokken door het gewicht van de bol.

Bij de constructie van het aandrijfmechanisme, dat moet zorgen dat de slinger zonder vermindering van amplitude blijft doorslingeren, moest rekening worden gehouden met het feit dat het ophangpunt, na de montage van de slinger, slechts zeer moeilijk toegankelijk zou zijn. Derhalve moest de aandrijving beneden bij de bol geschieden. Gekozen werd een oplossing waarbij de bol wordt afgestoten met behulp van wervelstromen, die erin worden opgewekt door een op het voetstuk (*fig. 5*) geplaat-

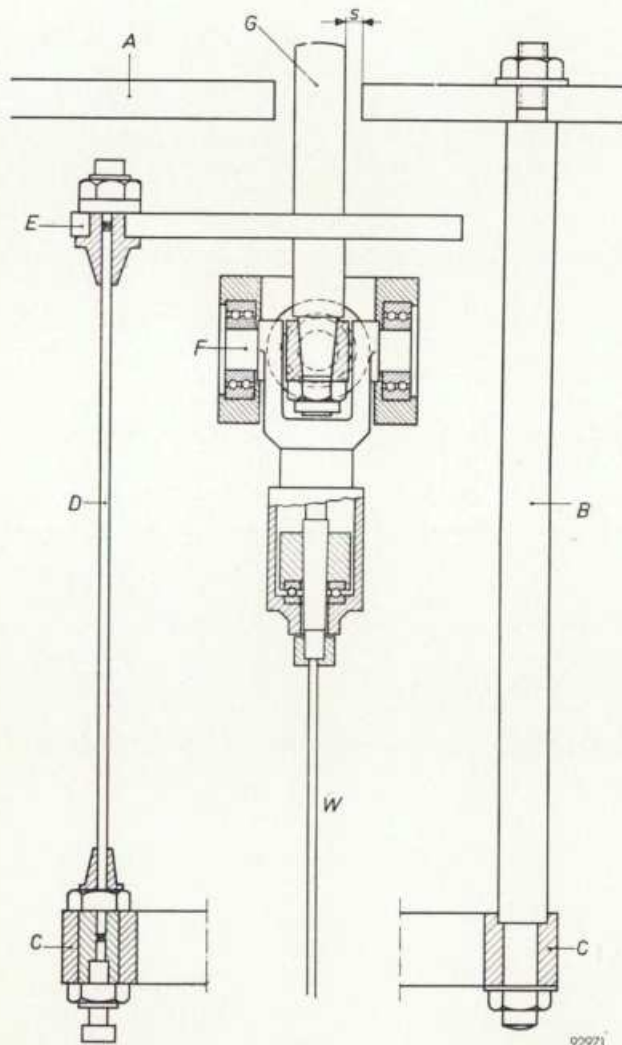


Fig. 4. Schematische voorstelling van het ophangstelsel van de slinger in het gebouw der Verenigde Naties. De plaat *A* draagt via de drie staven *B* een ring *C*. Deze ondersteunt door middel van de drie ronde staafveren *D* het juk *E*, waaraan het cardanscharnier *F* is bevestigd. De pen *G* bevindt zich in een in de bovenplaat aangebracht gat, en beperkt de zijdelingse uitwijking van het juk tot de kleine afstand *s*. De ophangdraad *W* is aan het scharnier bevestigd door in te klemmen in een stalen conus. De dimensies van de staafveren zijn zo gekozen dat enerzijds de gewenste zijdelingse stijfheid aanwezig is en anderzijds de erin optredende buigspanning beneden de wisselbuigsterkte blijft.



Fig. 5. Het door de architect G. Rietveld ontworpen voetstuk, waarop de aandrijfspoel is aangebracht. Het is voorzien van de inscriptie:

It is a privilege to live
This day and to-morrow.

Juliana

ste spoel, die op geschikte tijdstippen wordt bekrachtigd met wisselstroom. Plaatst men nl. boven een dergelijke spoel loodrecht op de as een koperen plaat, dan worden daarin elektrische spanningen geïnduceerd die ten opzichte van het veld 90° in fase verschoven zijn, en stromen die weer vrijwel 90° met die spanningen in fase verschillen. De wervelstromen zijn derhalve vrijwel 180° in

fase verschoven ten opzichte van de stroom in de spoel, zodat afstoting optreedt. Bevindt een niet te grote, horizontale ronde plaat zich met zijn middelpunt juist in de as van de verticaal opgestelde spoel, dan is de resulterende kracht erop verticaal gericht, maar indien de plaat zich iets excentrisch van de spoelas bevindt, heeft de kracht ook een horizontale component, die voor aandrijving van de slinger

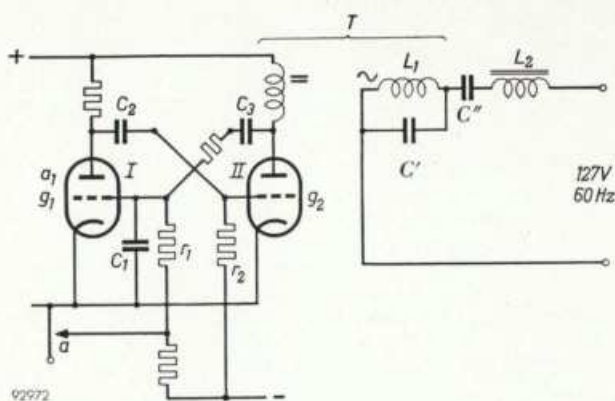


Fig. 6. Commando- en voedingsschakeling voor de aandrijving van de slinger. De commandoschakeling (links) bewerkstelligt dat de door het plaatselijke net geleverde wisselstroom voor de aandrijfspool L_2 pas wordt ingeschakeld (beter gezegd: aanzienlijk in sterkte toeneemt) nadat sinds het openen van het contact a een zekere tijd verlopen is, en zolang ingeschakeld blijft als nodig is, 60k al wordt het contact a inmiddels weer gesloten. Het contact a wordt gevormd door de pen G (fig. 4) en het gat waarin deze zich bevindt. In de rusttoestand voert de buis I stroom en is debuis II „dicht”. Wordt a geopend, dan daalt de potentiaal van g_1 en stijgt de potentiaal van a_1 en (via C_2) van g_2 ; buis II gaat stroom voeren en buis I gaat dicht. De tijd tussen dit „omklappen” en het openen van a hangt af van het produkt $C_1 r_1$. De anodestroom van buis II vloeit door de gelijkstroomwikkeling van de transductor T en verlaagt de waarde van L_1 zodanig dat de voedingsschakeling (rechts) in serieresonantie komt. Na een tijd, die afhangt van de produkten $C_3 r_2$ en $C_3 r_1$, keert de commandoschakeling terug in de rusttoestand en stijgt L_1 weer. De waarde van C' is zodanig gekozen dat nu resonantie optreedt in de kring $L_1 C'$. Deze kring vertegenwoordigt dan in de keten een hoge impedantie, zodat de stroom zeer veel kleiner wordt en als uitgeschakeld beschouwd kan worden.

gebruikt kan worden. Een dergelijke plaat bevindt zich onder in de bol. Ten einde het magnetisch veld op de plaat te concentreren, zijn om de spoel 18 U-vormige jukken van ferroxcube aangebracht.

De hier gekozen oplossing vermijdt dus het gebruik van ijzer in de bol. Men voorkomt aldus beïnvloeding van de aandrijving door het magnetisch veld van de Aarde of door de ijzerconstructie van het gebouw.

Over de energieoverdracht bij deze wijze van aandrijven het volgende. De wervelstromen in de koperen plaat werken terug op de spoel en hebben ten gevolge dat aan de klemmen daarvan een kleinere zelfinductie wordt gemeten dan wanneer de plaat afwezig is. Wanneer de plaat zich verwijdert, neemt deze zelfinductie toe; de daarbij aan de plaat overgedragen energie is ongeveer gelijk aan $I^2 \Delta L$. Hierin is ΔL de betrokken verandering van de zelfinductie en I de stroom. Buiten beschouwing gelaten is hier het feit dat I zelf ook enigszins verandert. Mede door de wijze waarop de verdere schakeling is ingericht (zie onder), gaat de genoemde betrekking echter toch vrij nauwkeurig op.

Het tijdstip waarop de spoel wordt bekrachtigd, wordt bepaald door het moment waarop de pen die zich op het juk bevindt (vgl. fig. 4), de bovenplaat loslaat⁴⁾. Te dien einde vormen pen en gat

⁴⁾ R. Stuart Mackay, Amer. J. Phys. 21, 180, 1953, beschrijft een door wervelstromen aangedreven slinger waarbij de synchronisatie wordt ontleend aan de bol.

een elektrisch contact: zij zijn ook als zodanig geconstrueerd. Een vertragingsschakeling, die tevens de duur van de bekrachtiging regelt, zorgt ervoor dat de stroom in de spoel een vaste tijd na het genoemde moment wordt ingeschakeld, en wel zodanig dat dit gebeurt ongeveer op het ogenblik waarop het centrum van de bol de as van de spoel passeert. In de anodeketen van buis II van deze schakeling (zie fig. 6) is de gelijkstroomwikkeling van de transductor T opgenomen⁵⁾. De wisselstroomwikkeling L_1 hiervan is opgenomen in de voedingsschakeling van de aandrijfspool L_2 . Behalve deze componenten bevat de voedingsschakeling nog twee condensatoren; één ervan (C'') is in serie geschakeld met de spoelen, de andere (C') parallel aan L_1 . Wanneer de gelijkstroomspoel van de transductor niet wordt bekrachtigd, is de kring $L_1 C'$ in resonantie en vormt hij in de keten een zo hoge impedantie dat de stroom door L_2 slechts 85 mA is. Wordt de transductor bekrachtigd met de anodestroom van buis II , dan wordt de zelfinductie van L_1 ongeveer de helft kleiner. De capaciteit C'' is zo gekozen dat nu de gehele keten in serieresonantie komt. De stroom door L_2 neemt dan toe tot 240 mA. De verhouding tussen werk- en ruststroom lijkt niet bijzonder groot, maar bedacht moet worden dat de overgedragen energie evenredig is met het kwadraat van de stroom.

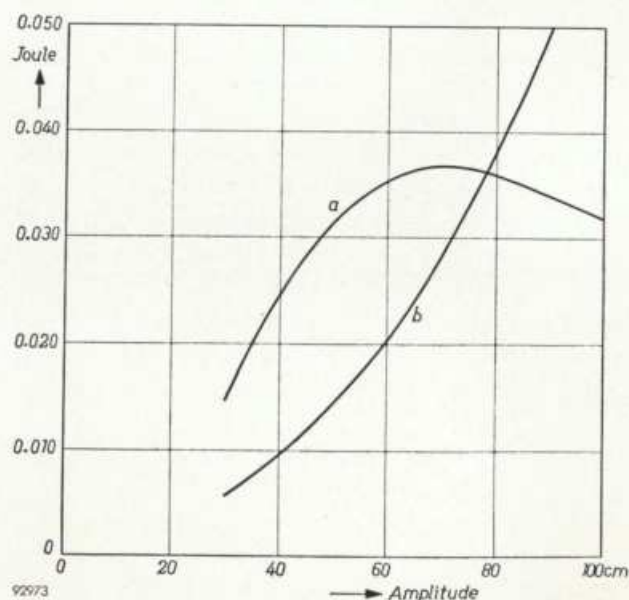


Fig. 7. Per periode aan de slinger toegevoerde (curve a) resp. door luchtwerijving verloren gaande (curve b) energie als functie van de amplitude. Bij een amplitude van ca. 80 cm snijden beide curven elkaar. Bij kleinere amplitude is de toegevoerde energie groter dan de verloren gaande, d.w.z. het snijpunt representeert een stabiele evenwichtstoestand.

⁵⁾ Een transductor is een smoorspoel met ijzerkern waarvan men de zelfinductie kan variëren door de ijzerkern meer of minder te magnetiseren met behulp van een gelijkstroomwikkeling.

Op deze wijze wordt per periode aan de bol ca. 0,035 joule toegevoerd, hetgeen voldoende is om de amplitude van de slinger te fixeren op de gewenste waarde van ca. 80 cm (zie fig. 7).

Samenvatting. Beschreven worden het ophangstelsel en de aandrijving van de monumentale slinger van Foucault welke zich in de hall van het gebouw van de Verenigde Naties te New York bevindt en die op 7 december 1955 door Z. Exc. Mr. H. Luns namens het Nederlandse volk aan de voorzitter van de Assemblée werd aangeboden. Het voornaamste probleem, het verhinderen dat de slinger ellipsbanen gaat beschrijven in plaats van in een plat vlak te slingeren, werd opgelost door gebruik te maken van een door Charron aangegeven principe.

De constructie is zó ontworpen dat tevens de kans op breuk door slijtage of vermoeiing tot een minimum is beperkt.

De aandrijving, die noodzakelijk is voor het compenseren van de energieverliezen (deze worden in hoofdzaak door de luchtdemping veroorzaakt), geschiedt door middel van een midden onder de slinger aangebrachte magneetspoel met ferroxcubekern. Deze spoel wordt bekrachtigd met wisselstroom en wekt aldus wervelstromen op in een koperen plaat die zich onder in de bol bevindt; dit heeft tot gevolg dat de bol wordt afgestoten. De bekrachtigingsstroom wordt gecommandeerd door een elektronisch relais, dat ervoor zorgt dat de stroom wordt ingeschakeld enige tijd nadat de slinger zelf een in het ophangstelsel aangebracht contact heeft verbroken, en dan gedurende een zekere periode ingeschakeld blijft. De spoel is aangebracht op een voetstuk dat werd ontworpen door de architect G. Rietveld.

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLIKATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publikaties, voor zover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, op aanvraag overdrukken.

2439*: H. G. van Bueren: Magnetoresistivity of plastically deformed metals (Deformation and flow of solids, Verslag van het van 26 tot 30 sept. 1955 te Madrid gehouden colloquium, verschenen bij Springer, Berlijn 1956, blz. 79-89).

De verandering die de elektrische weerstand van polykristallijn zuiver koper bij zeer lage temperatuur ondergaat als men een magneetveld aanlegt, blijkt aanzienlijk toe te nemen als men het koper bij deze lage temperatuur plastisch deformeert. Dat dit effect moet worden toegeschreven aan dislocaties en niet aan andere roosterfouten, blijkt o.a. hieruit dat het niet wordt beïnvloed door een tijdelijke verhoging van de temperatuur tot 200 °C. Van alle roosterfouten zijn namelijk alleen dislocaties ongevoelig voor een dergelijke temperatuurverhoging; andere roosterfouten diffunderen uit het materiaal. De weerstandsverhoging in een magneetveld is derhalve geschikt om het gedrag van dislocaties selectief te bestuderen. Er wordt een theorie gegeven die is gebaseerd op de onderstelling dat de anisotrope verstrooiing van elektronen aan dislocaties de oorzaak is van de weerstandsverhoging in een magneetveld. Deze theorie levert numerieke resultaten die een bevredigende overeenkomst vertonen met de metingen.

2440: F. A. Kröger en H. J. Vink: Relations between the concentrations of imperfections in crystalline solids (Solid State Physics, redactie: F. Seitz en D. Turnbull, deel 3, blz. 307-435, Academic Press Inc., New York 1956).

Sommige eigenschappen van kristallijne stoffen, zoals het elektrische geleidingsvermogen door elektronen of door ionen, de kleur, de luminescentie, de magnetische susceptibiliteit enz., worden in hoge mate beïnvloed door afwijkingen van de volmaakt geordende toestand, b.v. het voorkomen van vrije elektronen en gaten, van vacatures (onbezette roosterplaatsen), interstitiële atomen en vreemde atomen. De auteurs bespreken kwantitatief de relaties die tussen de concentraties dezer „fouten“ bestaan voor het geval dat thermodynamisch evenwicht heerst (dit is meestal slechts bij hoge temperaturen het geval). Uitgaande van een dergelijke toestand wordt ook iets gezegd over enige gevallen van onvolledig evenwicht, zoals dit b.v. bij snelle afkoeling kan ontstaan. De volgende gevallen worden behandeld:

- Een stof zonder chemische onzuiverheden en met een eenvoudige stoechiometrische verhouding der samenstellende elementen.
- Een stof zonder chemische onzuiverheden, maar met een samenstelling die iets van de eenvoudige stoechiometrische afwijkt.
- Stoffen die vreemde atomen van één of meer soorten bevatten.

Met behulp van de gegeven theorie — die gebaseerd is op de theorieën van Schottky en Wagner — kan men de gecompliceerde betrekkingen die bestaan tussen de omstandigheden waaronder een kristal is bereid en zijn elektrische, optische en magnetische eigenschappen, kwantitatief afleiden. Een bijzonder aspect van deze betrekkingen is de onderlinge afhankelijkheid van de oplosbaarheden van vreemde atomen.

2441: B. D. H. Tellegen: La recherche pour une série complète d'éléments de circuit idéaux non-linéaires (Rendiconti del Seminario Matematico e Fisico di Milano **25**, 134-144, 1953-54, Milaan 1955).

Men kan de vijf gewone netwerkelementen (weerstand, spoel, condensator, transformator en gyrator) opvatten als de eenvoudigste lineaire constante passieve systemen; deze opvatting houdt eigenlijk een definitie in van geïdealiseerde vormen der genoemde elementen. Van fysisch standpunt bezien kunnen systemen die men, voor zwakke signalen, opvat als lineair, constant en actief, evenals de systemen die men, voor zwakke signalen, opvat als lineair en variabel, en ook de niet-lineaire systemen, alle ondergebracht worden in de groep der niet-lineaire constante passieve systemen. Spoort men van de laatstgenoemde systemen de eenvoudigste op, dan wordt men geleid tot geïdealiseerde niet-lineaire netwerkelementen. Hiervan zijn er zeven die worden gekarakteriseerd door gewone vergelijkingen (in tegenstelling met differentiaalvergelijkingen) tussen stromen en spanningen, nl.: de ideale gelijkrichter, de spanningsput, de stroomput en vier typen van geïdealiseerde versterkers.

2442: H. G. van Bueren: Dislocaties in niet-metalen (Ned. T. Natuurk. **22**, 394-402, 1956, no. 12).

Verslag van een voordracht gehouden op het symposium „Dislocaties in vaste stoffen” van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging op 6 januari 1956. De voornaamste eigenschappen van dislocaties in de alkalihalogeniden en in de halfgeleiders germanium en silicium werden besproken. Bij alkalihalogeniden is het mechanisme waardoor dislocaties plastische vervorming mogelijk maken, hetzelfde als bij metalen; de invloed die deze roosterfouten uitoefenen op de fysische eigenschappen, is echter veel groter en men kan hiervan gebruik maken bij de bestudering der dislocaties. Zo treedt bij de alkalihalogeniden een verkleuring op wanneer de kristallen aan de werking van ioniserende straling worden blootgesteld. Deze verkleuring hangt samen met de aanwezigheid van vacatures, welke op hun beurt hun ontstaan danken aan de aanwezigheid van zogenaamde „treden” in de dislocaties. Ook op de ionengeleiding hebben dislocaties grote invloed. In germanium en silicium, welke stoffen valentiekristallen vormen, blijkt plastische deformatie een proces te zijn dat een thermische activenergie vereist en dat met een incubatietijd gepaard gaat. Dislocaties veroorzaken in deze

stoffen bovendien elektronenniveaus in de verboden band en hebben daardoor een grote en specifieke invloed op de elektrische eigenschappen.

2443: J. Bloem, A. J. van der Houven van Oordt en F. A. Kröger: A new luminescence emission in Cu_2O (Physica **22**, 1254-1256, 1956, no. 12).

Het is bekend dat Cu_2O luminesceert in het infrarood bij een golflengte van ca. $1\ \mu$. In dit artikel wordt een onderzoek beschreven waaruit is gebleken dat deze emissieband bij 20°K in twee banden is gesplitst; deze banden liggen bij $0,91\ \mu$ en bij $1,01\ \mu$. Monsters die bij 960°C waren bereid in zuurstofatmosferen met een druk van 10^{-1} tot 10^{-3} mm Hg, vertoonden bovendien twee luminescentiebanden bij kleinere golflengten, nl. bij $0,72\ \mu$ en bij $0,82\ \mu$. De eerstgenoemde banden worden toegeschreven aan kopervacatures, de laatstgenoemde aan zuurstofvacatures.

2444: J. A. Kok en M. M. G. Corbey: Breakdown of liquid insulating and dielectric material (Appl. sci. Res. **B6**, 197-206, 1956, no. 3).

Condensatoren met een dielektricum bestaande uit geïmpregneerd papier kunnen bij laagfrequente wisselspanningen op de duur doorslaan. Een der mogelijke oorzaken hiervoor is dat zich op de lange duur een geleidende brug vormt tussen de elektrodes, waarna gasvorming en doorslag door ionisatie optreden. Zo'n brug kan bestaan uit polariseerbare deeltjes, ionen of colloïdale verontreinigingen met grote dielektrische constante, en vooral uit geleidend materiaal. Deze deeltjes worden naar een plaats gedreven waar de veldsterkte maximaal is. Er bestaat een verband tussen de veldsterkte waarbij de bedoelde doorslag optreedt en de afmetingen der deeltjes. Bij een doorslagveldsterkte van $50\ \text{kV/mm}$ behoort, volgens dit verband, een deeltjesdiameter van ca. $40\ \text{\AA}$.

2445: J. A. Kok: Theory and probe measurements of Gabor's gas-filled triode (Appl. sci. Res. **B6**, 207-221, 1956, no. 3).

Metingen werden verricht met een sonde aan een met gas gevulde triode volgens Gabor met een over het gehele rooster gespreide ontlading. De ontlading tussen katode en rooster kan hierbij donker zijn. De vorm van de I_a-V_a -krommen werd bepaald. Het bleek mogelijk een verband te leggen tussen het criterium van Gabor en dat van Fetz voor de overgang van een gespreide tot een ingesnoerde ontlading.

2446*: J. Ugelstad en J. de Jonge: The alkaline hydrolysis of alkoxymethyl ureas (Acta chem. scand. **10**, 1475-1487, 1956, no. 9).

Alkoxymethylureumverbindingen bleken bij kamertemperatuur in een zwak alkalisch milieu gemakkelijk gehydrolyseerd te worden, waarbij ureum, formaldehyde en alcohol als eindprodukten werden gevonden. Op grond van kinetische onderzoeken in een sterk alkalisch milieu werd uitgemaakt welke van twee mogelijke reactiewegen wordt gevolgd. Er kon worden vastgesteld dat bij de reactie een etherband wordt verbroken, d.w.z. dat methylolureum en een alcohol de eerste ontledingsprodukten zijn. Het proces werd kinetisch onderzocht aan verscheidene der genoemde verbindingen. De hydrolyse bleek evenredig met de concentratie der OH-ionen. Het mechanisme van de reactie wordt besproken. De reactie is typisch voor alkoxymethylureumverbindingen; N-alkoxymethylcarbonzuuramides zijn daarentegen in een alkalisch milieu vrij stabiel.

2447: H. Zijlstra: Maximum energy product of crystal-oriented polycrystalline Ticonal G (Alnico 5) magnet steel (J. appl. Phys. **27**, 1249-1250, 1956, no. 10).

Uitgaande van de aan een eenkristal van „Ticonal” G magneetstaal (een legering voor permanente magneten) in de [100]-, de [110]- en de [111]-richting gemeten waarden van het maximale energieprodukt, wordt het te verwachten maximale energieprodukt voor deze legering berekend in afhankelijkheid van de mate waarin een bepaalde kristaloriëntatie (verkregen door „gerichte stolling”) is tot stand gebracht.

2448: J. A. W. van der Does de Bye: Analysis of the scintiscanning problem (Nucleonics **14**, no. 11, 128-134, nov. 1956).

Radioactieve isotopen die γ -stralen uitzenden, vinden toepassing in de geneeskunde bij de bestudering van lichaamsorganen die de stof welke een dergelijk isotoop bevat, selectief opnemen. Dikwijls is het wenselijk de verdeling van het radioactieve isotoop in het te onderzoeken orgaan nauwkeurig in kaart te brengen. Men heeft dan een stralings-detector nodig (b.v. een scintillatiekristal) waarmee men het orgaan kan aftasten. Deze detector dient te zijn voorzien van een collimator waardoor slechts straling die binnen een kleine ruimtehoek invalt wordt opgevangen. Het onderhavige artikel behandelt problemen in verband met het ontwerp van deze collimator en met de keuze van de methode welke de volledigste resultaten levert voor een gegeven hoeveelheid radioactief materiaal en een gegeven meettijd.

2449: W. Verwey: Die Zündung explosiver Gasgemische beim Bruch von nicht brennenden Leuchtstofflampen (Z. angew. Phys. **8**, 521-530, 1956, no. 11).

Fluorescentielampen die ontsteken met koude elektrodes, dus zonder starter („TL”X-lampen), geven, als zij breken in explosieve gasmengsels van lucht en methaan (mijngas), geen explosiegevaar, in tegenstelling met gloeilampen en normale, met starter ontstekende, fluorescentielampen. Sommige zeer explosieve gasmengsels (b.v. lucht met ca. 45% waterstof) kunnen echter reeds door het breken van niet-brandende fluorescentielampen tot ontploffing worden gebracht. Dit verschijnsel werd onderzocht. Het is gebleken dat, als gevolg van de stootgolf die optreedt bij het instromen van het explosieve gasmengsel tegen de edelgasvulling van de lamp, de temperatuur van dit edelgas zo sterk oploopt dat het explosieve mengsel wordt ontstoken. Voor een gegeven explosief gasmengsel hangt het af van het moleculaire gewicht en de druk van de edelgasvulling of een explosie al of niet zal optreden. Bij proeven met niet met fluorescentiepoeder bedekte buizen werd, voor de drie onderzochte explosieve mengsels (lucht met 45% waterstof, met 10% methaan en met 20% lichtgas), een bepaald gebied van moleculaire gewichten en vuldrukken van de edelgasvulling gevonden waarbinnen explosie optreedt. De grenzen van deze ontstekingsgebieden kunnen worden verklaard op grond van berekende waarden van de temperatuur en de druk in de stootgolf en van bekende eigenschappen van ontstekingsgrenzen bij lage druk. Was echter de buis bedekt met fluorescentiepoeder, dan trad in explosieve mengsels van lucht met methaan en van lucht met lichtgas, voor geen enkele edelgasvulling een ontploffing op.

2450: S. Woldring: Continuous non-bloody recording of arterial pressure in man (Acta physiol. pharmacol. neerl. **5**, 250-251, 1956, no. 2).

Korte samenvatting van een voordracht over een experimentele opstelling waarmee, volgens de methode van de ontspannen arteriewand, de bloeddruk bij de mens continu kan worden geregistreerd.

2451: C. M. van der Burgt: Performance of ceramic ferrite resonators as transducers and filter elements (J. Acoust. Soc. Amer. **28**, 1020-1032, 1956, no. 6).

Er zijn ferrieten ontwikkeld die speciaal geschikt zijn om als piëzomagnetische trillers te worden gebruikt. Door toevoeging van geringe hoeveelheden

kobalt aan nikkel-zinkferrieten en door toepassing van een bijzonder sinterproces, bleek het mogelijk essentiële verbeteringen van de materiaaleigenschappen te verkrijgen. Bij continue belasting kunnen de aldus bereide ferrieten akoestische stralingsintensiteiten opwekken van ten minste 10 watt per cm^2 doorsnede van de kern; het elektroakoestische rendement bedraagt daarbij meer dan 75% voor frequenties tot 50 kHz. Deze ferrieten zijn derhalve zeer aantrekkelijk voor onderwatercommunicatie en in het algemeen voor toepassingen in vloeistoffen; dit niettegenstaande hun brosheid (treksterkte slechts tot ca. 6 kg/mm²). Bredebandonderwaterontvangers (hydrofoons) met een lineaire frequentie-karakteristiek en een grote gevoeligheid kan men met dergelijke ferrieten bouwen, daar deze ferrieten, bij de remanente magnetisatie, een magnetomechanische koppelingscoëfficiënt bezitten die bijna 0,25 bedraagt en die dus bijna gelijk is aan die van „Permendur” en groter dan die van nikkel. De totale variatie in het temperatuurgebied van 20 tot 50 °C van de mechanische resonantie en anti-resonantiefrequenties van ferriettrillers als elektrische filterelementen, die voor de bestaande commerciële ferrieten ca. 0,1-0,25% bedraagt, is voor de nieuw ontwikkelde materialen teruggebracht tot beneden 0,03%. Daar de mechanische kwaliteitsfactor gewoonlijk groter is dan 2000, kunnen de besproken ferrieten met succes worden toegepast bij de constructie van elektrische en elektromechanische bandfilters. Verscheidene van de in dit artikel behandelde punten zijn ook besproken in Philips techn. T. 18, 285-298, 1956 (no. 10).

- 2452: J. L. J. van de Vliervoet, P. Westerhof, J. A. Keverling Buisman en E. Havinga: Studies on vitamin D and related compounds, VI. The synthesis and properties of dihydrotachysterol₃ (Rec. Trav. chim. Pays-Bas 75, 1179-1186, 1956, no. 9-10).

Terwijl dihydrovitamine D₃I en dihydrovitamine D₃II geïsoleerd konden worden uit de mengsels die verkregen waren door reductie van cholecalciferol met natrium en een alcohol, slaagde men er niet in uit dergelijke mengsels het dihydrotachysterol₃ in kristallijne vorm te verkrijgen. Zuiver dihydrotachysterol₃ kon echter wel worden verkregen door tachysterol₃ te reduceren in vloeibare ammoniak met overmaat lithium, vervolgens het

verkregen ruwe reductieproduct te concentreren door chromatografie over aluminiumoxyde, daarna te veresteren met fenylazobenzoylchloride en ten slotte de zuivere gekristalliseerde ester te verzeppen. Het ultraviolet- en het infraroodabsorptiespectrum worden gegeven. Het vermogen van dihydrotachysterol₃ om het calciumgehalte van het bloed te verhogen, bleek ca. twee maal zo groot te zijn als dat van dihydrotachysterol₂.

- 2453: H. D. Moed en J. van Dijk: Synthesis of β -phenyl-ethylamine derivatives, IV. A new vasodilator (Rec. Trav. chim. Pays-Bas 75, 1215-1220, 1956, no. 9-10).

Beschrijving van de bereiding van derivaten van β -fenyl-ethylamine en van hun therapeutische waarde als bloedvatverwijdend middel.

- 2454: P. Westerhof en J. A. Keverling Buisman: Investigations on sterols, VIII. Some hitherto unknown irradiation products of ergosterol (Rec. Trav. chim. Pays-Bas 75, 1243-1251, 1956, no. 9-10).

Door langdurige bestraling van ergosterol met ultraviolet werd een toxisterol₂-mengsel verkregen, waaruit twee, of mogelijk drie, tot nu toe onbekende verbindingen werden geïsoleerd in de vorm van gekristalliseerde esters.

Verschenen is:

R. Kretzmann: Industrial electronics (Philips' Technische Bibliotheek ¹⁾, Meulenhoff & Co., Amsterdam 1957, VIII + 192 blz., 206 figuren).

Bovengenoemd boek is geschreven als vervolg op „De elektronentechniek in de industrie” ²⁾ van dezelfde schrijver, met het doel te voorzien in de toenemende behoefte aan een overzicht van elektronische schakelingen voor industrieel gebruik die hun deugdelijkheid in de praktijk hebben bewezen. De zes hoofdstukken zijn getiteld: 1. Photoelectrically controlled apparatus, 2. Counting circuits, 3. Stabilizing circuits, 4. Contact and control devices, 5. Oscillator and amplifying circuits, 6. Rectifier and motor control circuits. Een literatuurlijst en een register besluiten het boek.

¹⁾ Een Nederlandse en een Franse uitgave van dit boek zullen eveneens in Philips' Technische Bibliotheek verschijnen. In het Duits is het uitgegeven door Verlag für Radio-Photo-Kinotechnik, Berlijn-Borsigwalde.

²⁾ Besproken in Philips techn. T. 16, 382, 1956 (no. 12).